

管列における膜状凝縮熱伝達の実験的研究

著者	清田 裕祥
学位授与機関	東京商船大学
学位授与年度	1975
URL	http://id.nii.ac.jp/1342/00000877/

修 士 論 文

題目 管列における膜状凝縮熱伝達の
実験的研究

指導教授 堀 田 秀 夫

商船学研究科機関学専攻

昭和 49 年入学

氏 名 清 田 裕 祥

昭和 51 年 1 月 31 日提出

管列における膜状凝縮熱伝達の実験的
研究

指導教官

堀田秀夫 教授

清田裕祥

目 次

1. ま え が き	1
2. 実験装置 及び 実験方法	7
2.1 実験装置	7
2.2 実験方法	14
3. 滞留空気の影響, Vent 蒸気量の決定	18
3.1 滞留不凝縮ガスの凝縮熱伝達 に及ぼす影響	18
3.2 Vent 蒸気量の決定	20
4. 管壁温度の測定	24
4.1 測定法	24
4.2 抵抗計測用リード線を器外に取付 けたときの管平均温度の校正法	29
4.3 管の内外表面温度	36
5. 実験結果 及び 考察	39
5.1 単一水平管の凝縮熱伝達	39
5.2 冷却水側の熱伝達	46
5.3 管列における凝縮熱伝達	52
5.4 熱通過率	60
5.5 傾斜管の熱伝達	65

6. 結論

71

参考文献

74

付録

付1

1. まえがき

火力発電プラント、船用タービンプラント等の単位出力の急激な増大や多段フラッシュ海水淡水化プラント等の開発などによりともほう復水器あるいは凝縮器の大型化や改良につれて、凝縮熱伝達の研究が盛んになってきた。

単一水平円管の外表面での膜状凝縮熱伝達^[1]については Nusselt が理論解析して以来多くの研究者により理論又は実験的にその改良、発展がなされている。McAdams^[2] が多くの研究者の研究をまとめた結果では、これらの実験値は Nusselt 解の $-30 \sim +70\%$ の範囲に広がり、水蒸気では約 $\pm 3\%$ 大きくなるとしており、最近藤井^[3] のまとめた実験結果でも水の場合 $\pm 30\%$ であるとしている。また Nusselt は復水器等の伝熱管群のように、管外表面で蒸気が凝縮し、その凝縮液が下部管列に滴下する垂直管群の熱伝達についても解析しているが Berman^[4] や Young - Wohlenberg^[5] はその実験結果から上部管列の下部管列への凝縮液の影響は Nusselt 理論よりも少ないと述べている。

単一管や管群などの実験値がこのように Nusselt 理論と大きく異なるのは実際の凝縮液の挙動が複雑であり、Nusselt 理論の

モデルが実際の凝縮状況と異なるのと、凝縮熱伝達の実験では、蒸気側、管壁、冷却水側それぞれの熱抵抗が小さく、わずかな測定誤差が熱伝達率に大きな影響を与えるからであり、特に管壁温度が充分正確に測定できなかった事などが原因としてあげられる。

本実験では管壁温度測定に新しい方法を採用し、静止蒸気中に垂直に配列した6本の外径12 mm、内径10 mmのアルミニウム管を用いて、管表面の蒸気の凝縮状況を観察すると同時に、単一管に相当する管列最上部の管ではその凝縮熱伝達率を求めて *Nusselt* の値と比較し、管列では上部管列の下部管列への滴下凝縮液の影響を調査し、従来の研究と比較検討した。

[6]

また *Ginabat* は管列を管列方向、あるいは管の長さ方向に傾斜させれば上部管列の液滴の影響を軽減できるとしており、管列方向では各管をそれぞれの切線上に配列することによって熱伝達率の増加が得られ、管の長さ方向では水平から 60° 以上傾ければ、各管で生成された凝縮液が滴下することなく長さ方向に流下することを実験的に確かめている。本実験では垂直管列に続き、管列を長さ方向に傾斜させある角度範囲内では水平管列と同じ冷却水側の条件でも交換熱量の増大

が得られることを確かめた。

凝縮熱伝達を利用する熱交換器では伝熱量、伝熱面積等を算出するために上記の凝縮熱伝達率を知ると同時に冷却水側の熱伝達率の値も正しく求める必要がある。従来冷却水側のような管内の発達した流れについて、管と冷却水の温度差の余り大きくなり場合について Dittus - Boelter^[7]の式、温度差が大きく一定熱負荷と考えられる場合については Allen - Eckert^[8]の式が広く用いられている。本実験では凝縮熱伝達率を求めるのに必要は交換熱量、管壁温度から同時に冷却水側熱伝達率も得られるので、上記実験式の精度についても合わせて検討した。

記号

A : 管の断面積 $[m^2]$

A_k : (5.13)式の定数

a, \dots, a_n : (4.1)式で定義される定数

c : 比熱 $[kcal/kg \cdot ^\circ C]$ B or 積分定数

C_L : (5.7)式で定義される温度助走区間の補正係数

C_{PL} : 凝縮液の比熱

d : 管径 d_1, d_2 : 内径, 外径 $[m]$

Fr_d : フルード数 $U_\infty^2 / g d_2$

G : 冷却水流量 $[m^3/h]$

g : 重力の加速度 $[m/s^2]$

H : 顕熱≒潜熱比 $(C_{PL}(T_s - T_{w2}) / \lambda$

$\bar{h}_s, \bar{h}_{s1}, \bar{h}_{sn}$: 蒸気側, 蒸気側第1列, n 管列の熱伝達率

$\bar{h}_{sm}, \bar{h}_{hm}, \bar{h}_{out}, \bar{h}_{sl}$: n 管列の平均, 水平管, 垂直管, 傾斜管の熱伝達率 $[kcal/m^2 h \cdot ^\circ C]$

\bar{h}_w : 冷却水側の熱伝達率 $[kcal/m^2 h \cdot ^\circ C]$

K : 熱通過率 $[kcal/m^2 h \cdot ^\circ C]$

k : 冷却水, 凝縮水の熱伝導率 $[kcal/m h \cdot ^\circ C]$

k_a : アルミ管の熱伝導率 $[kcal/m h \cdot ^\circ C]$

L, L_1, L_2 : 図4.2で定義した管の長さ $[m]$

l : 管の長さ

m : (4.11)式, (5.10)式の指数

Nu : ヌセルト数

n : 管列

Pr : プラントル数

Q : 交換熱量 $[kcal/h]$

R : P ユビ $(\rho_L \mu_L / \rho_V \mu_V)^{1/2}$

Re : レイノルズ数

R_T, R_o, R_{o1}, R_{o2} : (4.1), (4.1)' 式で定義した 管の抵抗

r : 半径

T_g : 蒸気温度 $[^{\circ}C]$

T_m, T_{m0} : 管の平均温度

T_{w1}, T_{w2} : 管の内外壁温度

$T, T_1, T_2, T_x, T_{1x}, T_{2x}$: 図 4.2 で定義した 管の温度

t, t_1, t_2 : 冷却水温度、入口、出口温度

$\Delta t, \Delta t_1, \Delta t_2$: 図 4.2 で定義した 蒸気温度と冷却水との温度差

u_{∞} : 蒸気流速 $[m/s]$

u : 冷却水流速

u_m : 凝縮液流速

W : 冷却水水当量 $G \times c$ $[kcal/h^{\circ}C]$

x : 長さ $[m]$

x_2 : $0.9 (1 + Pr / RH)^{1/3}$

γ : 凝縮液の厚さ $[m]$

δ : 比重 $[kg/m^3]$

λ : 蒸気置換熱 $[kcal/kg]$

μ : 粘性係数 $[kcal \cdot sec / m^2]$

μ_b, μ_w : (5.6) 式で定義した冷却水粘性係数

μ_L, μ_V : 凝縮水, 蒸気の粘性係数

ρ_L, ρ_v : 凝縮水, 蒸気の密度 $[kg/m^3]$

ϕ : T_{m0}/T_m , 角度

ψ : 管の傾斜角度

γ_L, γ_H : (5.13) で定義される, 温度, 管材料補正係数

ψ : (5.2) で定義される係数

2. 実験装置 及び 実験方法

2.1 実験装置

実験装置の全体図を 図2.1 に示す。蒸気発生源として常用気圧 1 atg の実験室設置のエバラ・ハニシエル ボイラを用い、発生した蒸気は二段の減圧弁で 0.5 atg に減圧し、更に蒸気圧調節弁①、フレキシブル・パイプ②を経て、コンデンサに供給する。器内圧は水銀マノメータ⑭を用い調節弁①によって実験中一定に維持するよう適当に調節した。試験冷却管③で凝縮した蒸気は凝縮水冷却器④を経て排水計測した。

冷却水は上水道管に取り付けたラインホフ⑥によってヘッダー⑦に供給され、上下に配列した6本の管に分割し、各々の流量調節弁⑧及びオリフィス⑨、10温度計⑫を経てアルミニウムの試験冷却管に入る。流量はあらかじめ校正したオリフィスを用い調節弁⑧によって調節した。乱流の速度助走区間はラウコ「9」によれば

$$l/d_1 = 0.693 Re^{1/4}$$

で、試験時の最大流速 3.2 m/s において、 $l/d_1 \approx 10$ である。よって試験管の復水器までの長さを、充分余裕をみて $l/d_1 = 30$ とする。よって $l = 300 \text{ mm}$ とした。復水器での熱交換

を終えた水は混合器 ⑩ を通り出口温度計 ⑬ へ、⑪ を経て 適当なヘッドをもたせた排水槽に排水した。冷却水入、出口及び蒸気温度測定には、あらかじめ校正した 銅-コニクス 熱電対温度計を使用した。蒸気温度測定のための熱電対はその先端を中央部に設置し、冷却水入口温度は 6 管列すべて同一温度と考えられるので熱電対を 4 管列のオリフィス出口に設置した。各管の冷却水出口温度は均一な混合平均温度を得るよう伝熱管出口に混合器を設け、冷却水を充分混合させたのち熱電対により測定した。温度測定には $\pm 0.0002 \text{ mV}$ 精度のデュータール mV 計を使用した。

図 2.2 はコニクスの詳細図である。試験冷却管として 外径 12 mm 、内径 10 mm のアルミ管を用い、コニクス蒸気流入部の 380 mm 下に 1 管列を、以下ピッチ 18 mm にって図のように垂直に 6 管列配置した。冷却管のコニクス貫通部は O リングを用いて蒸気の漏洩を防いだ。コニクス前面には凝縮液滴の挙動を観察するため、 $190 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ の透明ポリカーボネードを使用した観測窓を設置し、他の側面はバークライト板とした。蒸気流入管はコニクス全面に均一に蒸気が供給されるように、流入端より奥に行くにつれ断面を小さくしたスリットを上向

きに設けた。また Vent 取出管は「凝縮液」が Vent 管に入らないように管下部に均一にスリットを設けた。

各熱負荷における試験冷却管の平均温度 T_{mo} は 4 章に述べるように、管の電気抵抗変化から求めた。図 2.3 にその測定用の配線図を示す。

各試験冷却管に電流端子 (16) と電圧端子 (17) を取り付け、電圧源として 12V の蓄電池を使用し、測定時のみ電流端子を径て試験冷却管に可変抵抗器 (18) で調整しながら 1 Amp 通電した。試験アルミ管の電気抵抗は測定区間で約 $3 \sim 4 \times 10^{-4} \Omega$ 程度なので、1 Amp の電流を通いてもジュール熱は $2.58 \sim 3.44 \times 10^{-4} \text{ kcal/h}$ にすぎず「水」が伝熱に影響を及ぼすことはない。電流の測定は $2 \text{ m}\Omega$ の分流器 (19) を使用し $\pm 0.0002 \text{ mV}$ 精度のデジタル電圧計で計測し、また電圧端子間の電位差 mV も電流測定と同種のデジタル電圧計で計測した。

本実験のように管の温度が冷却水入口端から出口端まで変化するとき、両電圧端子に温度差を生じ、電位差測定用リード線が試験冷却管と異種金属であるときは勿論、同一金属でも同質でない場合はその温度差によって熱起電力が発生し、通電方式によって熱起電力分だけ実際の測定電位差に加算または減算される。したがって切換スイッチ

(20)で極性を逆にし両者の平均をとり管平均温度を算出した。又電位差測定用のリード線は上述した熱起電力をばるべく小さくするため、試験冷却管と同一金属であるアルミニウム線を採用した。電圧端子は冷却管伝熱部の両立端に取付けるのが望ましいが取付部が凝縮熱伝達に影響を及ぼさばいように、またリード線のコネクタ外への取出しの困難等を考え、器外の両立端から $\geq 8\text{ mm}$ の位置に取り付け、さらに電流端子は電圧端子に影響を及ぼさばいようにその外側 50 mm 以上の位置に取付けた。電圧端子を器外に取付けた時の伝熱部管平均温度の算出については第4章に述べる。

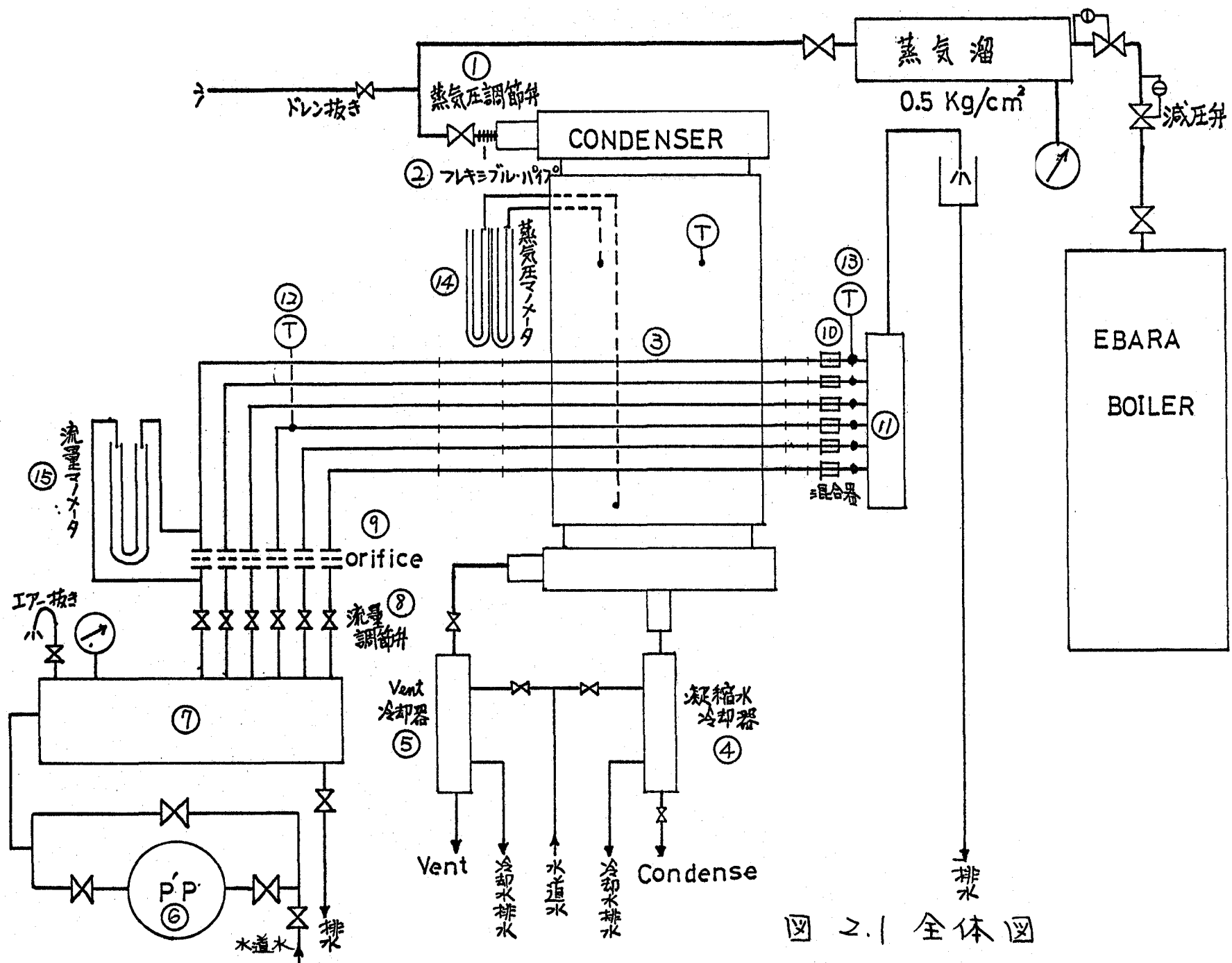
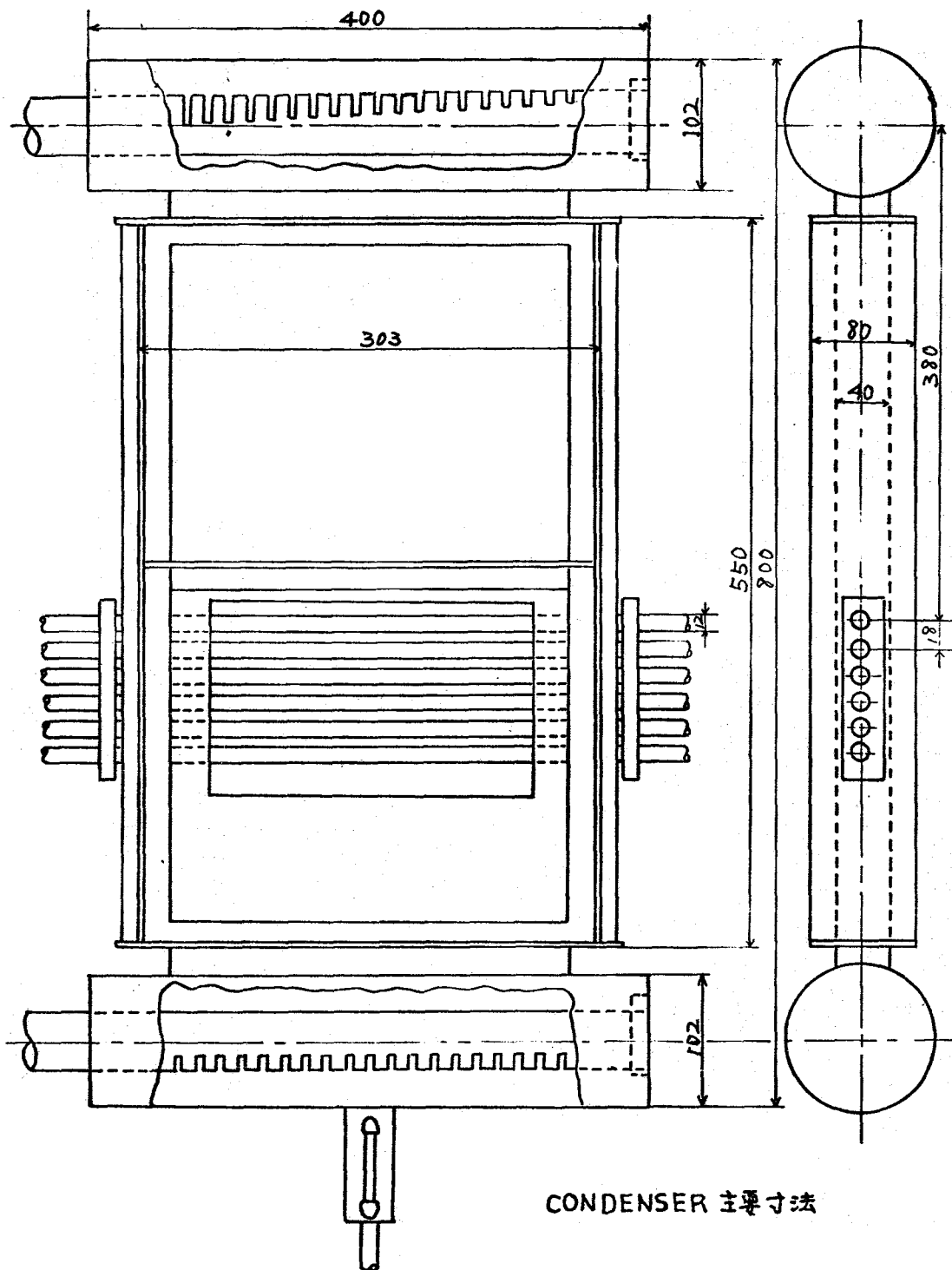


図 2.1 全体図



CONDENSER 主要寸法

図 2.2 コンデンス 詳細図

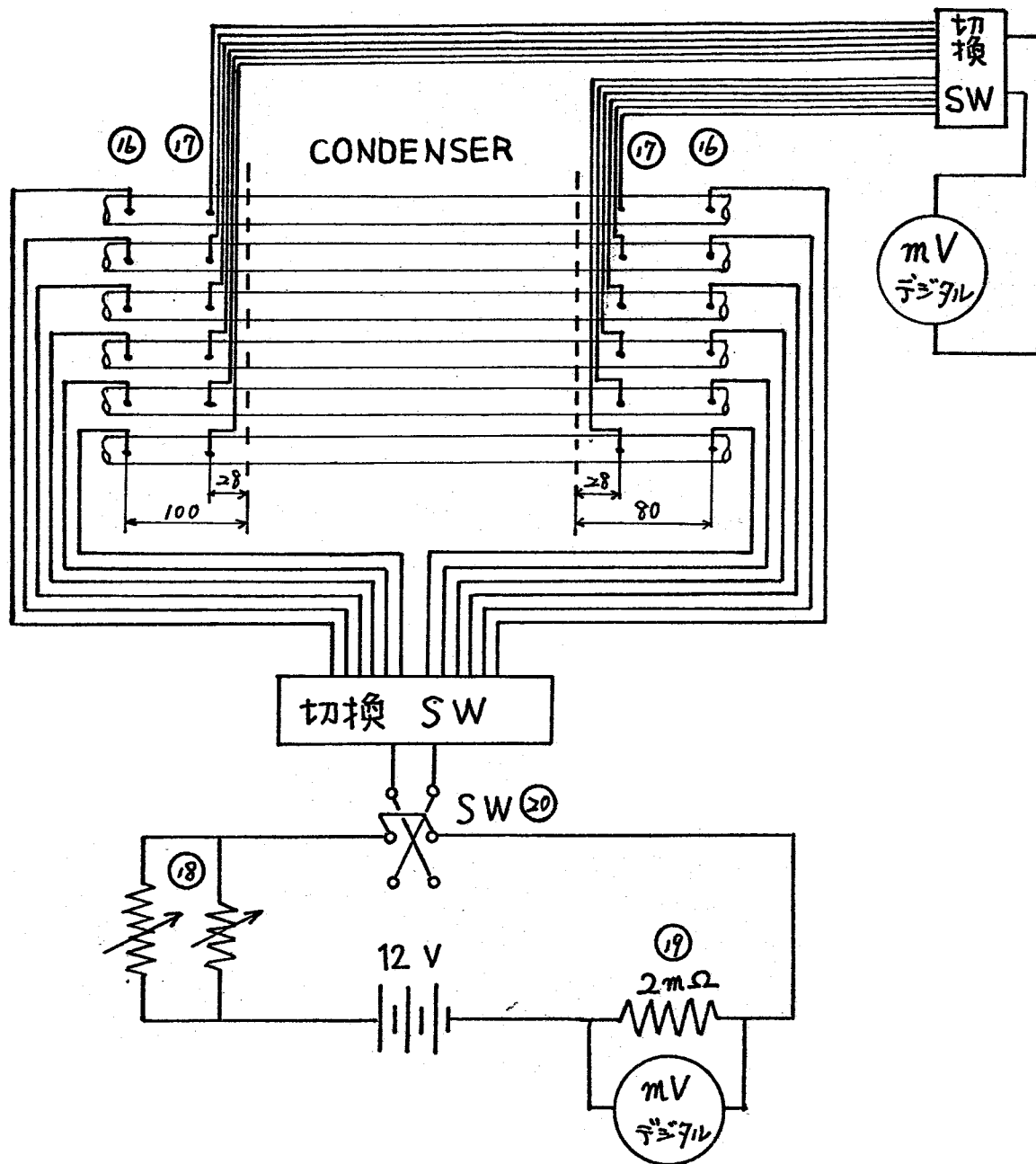


図2.3 試験冷却管平均温度測定用
配線図

2.2 実験方法

凝縮熱伝達実験では各部の熱抵抗が非常に小さいのでゆずかば汚れも大きば測定誤差をまねくと同時に蒸気側の汚れは、凝縮状況を変えてしまう事になる。したがって実験にままたち、充分な伝熱面の清掃を必要とする。したがって内外表面の汚れ、および休止中の酸化物を水酸化カリウム溶液で除去した後水道水で充分洗浄した。

先に述べたように管壁温度を管の電気抵抗変化から測定しているので、凝縮実験に先んち基準となる抵抗 R_0 を求めた。 R_0 は冷却水を高速で通し、冷却水入口、出口温度が等しくなったときの冷却水温度に対する管の抵抗 R_T を計測して算出した。これは4章で述べるように管の外側が大変にさびさびしている時は管内の冷却水側熱伝達率は管外のそれ以上に大きき、管の平均温度は冷却水温度に等しいとみよせるからである。

その後蒸気調節弁を開いてコ=デ=サへ通気する。コ=デ=サは外部放熱等のため各部が安定するまで、約1時間の整定時間を要した。整定後冷却水入口温度、各管列の出口温度、蒸気温度、器内圧、凝縮量、Vent量、各管列の流速、管の抵抗の測定を行なった。流速を変えた時の各部の整定はコ=デ=サに蒸気温度、及びサ=1管列の

冷却水出口温度を記録させ、これから判定した。

交換熱量は各冷却管では流量と冷却水温度上昇から、全管列では各冷却管での交換熱量の合計または凝縮量から求めることが出来る。計測した凝縮量には器壁から大気への放熱に基づくものも含むので、これを差し引いて計算する必要がある。放熱量の測定は気温 28.8°C と 12.5°C の二回、試験冷却管を取除き器内圧を実験状態に調整し、実験と同様の Vent を行い充分運転した後、規定時間内の凝縮量から算定し、これ以外の気温ではこの内を直線近似を行なった。

図 2.4 に凝縮量と放熱量との差に蒸発熱を乗じて求めた交換熱量 Q_F と、冷却水流量と入口、出口温度差 $(t_2 - t_1)$ からの交換熱量の総合計 $\Sigma Q = \Sigma G C (t_2 - t_1)$ との関係を示す。

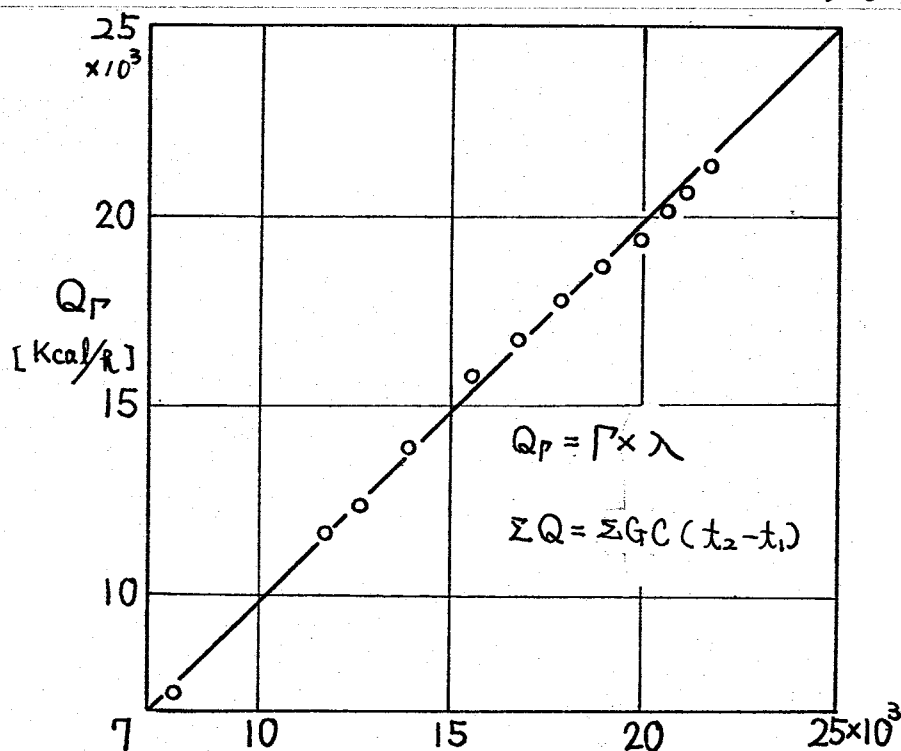


図 2.4 Heat balance ΣQ [Kcal/h]

図に示すように Q_1 と Q_2 はよく一致しており、各管での交換熱量は充分信頼できると思われるので後の計算に使用した交換熱量は

$$Q = Gc(t_2 - t_1)$$

を用いた。

従来凝縮実験での測定誤差の多くは、管内に滞留する不凝縮ガスによると言われている。本実験ではこの不凝縮ガスの影響を排除するため凝縮実験に先立ち、滞留空気の熱伝達に及ぼす影響を調査し、同時に滞留空気の影響を排除するために必要な Vent 蒸気量を決定した。

凝縮実験は水平管列、傾斜管列の2系列について行なった。水平管列では6管の冷却水流速が同一である場合、と同一熱負荷である場合について行ない、冷却水流速一定実験では流速 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 2.0, 2.5, 3.0 [m/s] の10段階に変化させ、熱負荷を変更した。その時の各管列の流速誤差は1~2%以下になるように注意した。同一熱負荷実験では、先づオ1管列の熱負荷を所定の値に設定し、オ2管列以下は冷却水量と冷却水出入口温度差の積がオ1管列のそれと等しくなるよう、冷却水流速を調節した。熱負荷は誤差2~3%以下に調整し、 2.38×10^5 , 2.94×10^5 [Kcal/m²h]

の2段階の実験を行なった。

傾斜管では各管の冷却水流速を $1.0, 2.0, 3.0$ $[m/s]$ の3通りに調整し、各流速の下で、試験冷却管を水平に对し、 $1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 15, 20$ $[deg]$ の8~9段階に長さ方向に傾斜させ、凝縮液の落下状態を観察すると同時に各部計測を行なった。その時の各管の流速誤差は1~2%以下に調整した。

3. 滞留空気の影響, Vent 蒸気量の決定

3.1 滞留不凝縮ガスの凝縮熱伝達に及ぼす影響

試験部に充分な蒸気量が供給されないと器内蒸気状態が不均一になり, 満足な凝縮を及ぼさなくなる。また充分な蒸気量が供給されたとしても, 蒸気中に空気のような不凝縮ガスを混入するときは, 蒸気の凝縮に伴い不凝縮ガスが伝熱面上に滞留し伝熱を阻害するようになる。Rose^[10]は垂直伝熱面での凝縮熱伝達実験で不凝縮ガスの滞留による凝縮熱伝達低下の状況を調査している。その結果によれば蒸籠ボイラと一体となつた凝縮伝熱面で, 蒸留水を使用し2~3時間の間充分に外部に蒸気を放出, 脱気した後の凝縮熱伝達実験でも時間の経過とともに伝熱面上に不凝縮ガスの滞留が起り, 常に適当量の Vent を行わなければ純粋蒸気の凝縮熱伝達が維持できないことを認めている。本実験のようにぶどう給水として水道水を使用した場合は上記に比しはるかに多くの不凝縮ガスが蒸気中に含まれていると考えられるので伝熱面上に滞留する不凝縮ガスの影響は顕著であると思われる。

この滞留空気が熱伝達に及ぼす影響を

調べるために、本実験と同一の実験を行ひ、適当量の Vent をしほから 熱負荷一定の下で充分長く運転し定常になった後 Vent を停止したときの各管列の熱伝達の変化を求めた。その結果を図 3.1 に示す。

図より各管列とも Vent 停止直後における熱伝達率の低下が著しく、約 5 分後からはその低下は緩慢となる。すなわち不凝縮ガスが試験冷却管の近くに滞留し、熱伝達に悪影響をおよぼしていることが分る。したがって不凝縮ガスの影響のより状態で凝縮熱伝達率実験を行はうには、常に適当量の蒸気を Vent する必要がある。

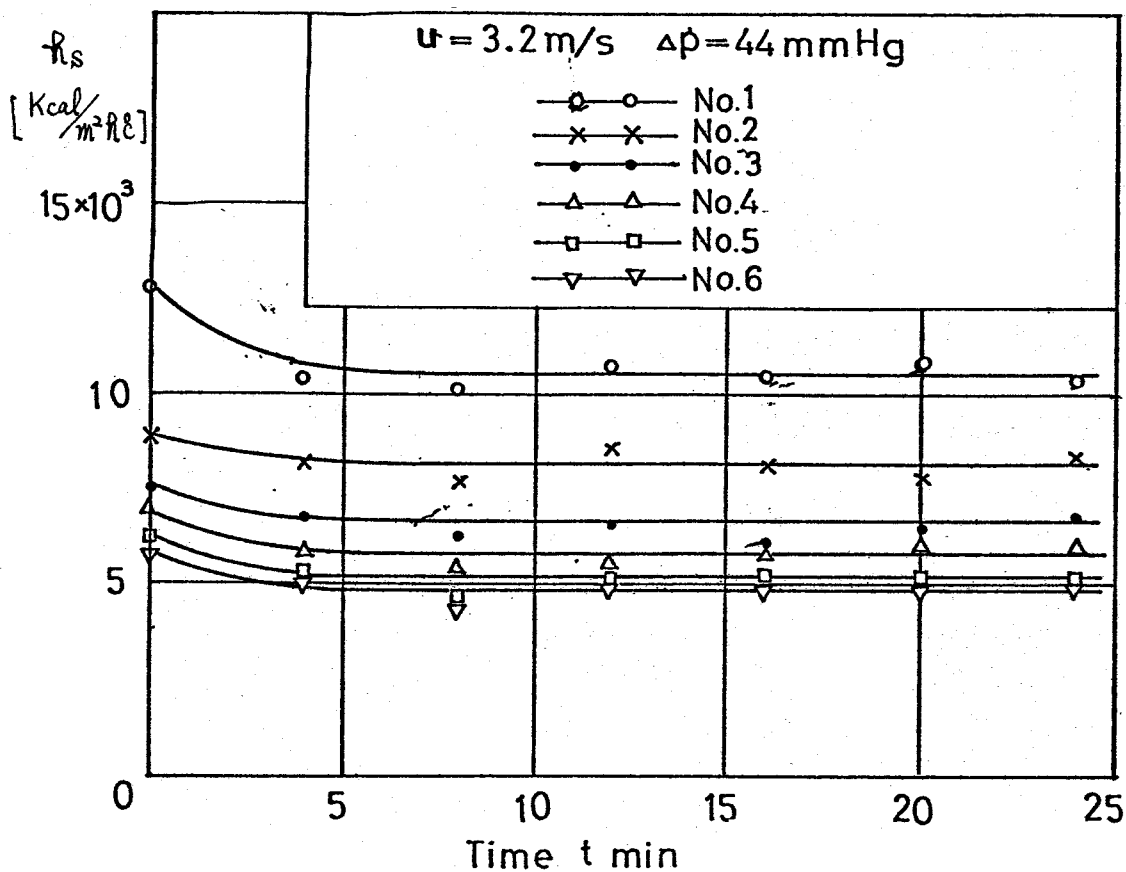


図 3.1 滞留空気実験

3.2 Vent 蒸気量の決定

Vent 蒸気量は蒸気の流速によって凝縮伝熱状況が変化せず、空気の滞留を起さばり適当な量を選定する必要がある。

Vent 量を調節するためには、釜内圧を一定にして放出弁を調節するか、弁開度一定の下で釜内圧を変化して行うことができる。前者はわずかの弁開度差が Vent 量を変化させ、適当量の Vent 量を維持するには、瞬時 Vent 量を測定するための計測装置が必要となる。後者では Vent 放出管の弁開度、管径、管長等を一定にすれば Vent 量は後に述べるように、釜内圧と入気圧との差 ΔP の $1/2$ 乗に比例するので、釜内圧測定だけで Vent 量を推定できる。しかし圧力変化が熱伝達に対して影響しないかどうかを確かめて置く必要がある。

本実験では後者の圧力調節による Vent 調節の方法を採用し、必要な Vent 量を求めるため、6 管列に同一の流速で冷却水を通し、低負荷では冷却水流速 0.6 m/s 、最高負荷では 3.2 m/s の 2 通りの状態で Vent 放出弁を全開として、蒸気圧を 0 mmHg より随時変化上昇させ実験を行った。図 3.2 は蒸気圧の増加に伴う Vent 量の変化を示したもので、概略 Vent 量は $\sqrt{\Delta P}$ に比例することがみられる。図 3.3 は ΔP に対する凝縮量を示し、 ΔP が低負荷

では約 15 mmHg まで, 最高負荷では約 25 mmHg まで
は, 凝縮量は顕著に増加するが, この値以上では
一定となり, 凝縮量に変化の無いことが認められる。

図 3.4. 図 3.5 は 供給蒸気量に対する Vent 量の比
である Vent 比 に対する 凝縮量 及び 蒸気側熱伝
達率 h_s の変化を示した。これらの図によれば, 負
荷の大小にかかわらず Vent 比 0.15 ~ 0.2 程度で 凝
縮量 及び 蒸気側熱伝達率 h_s もほぼ一定とな
り, その後 Vent 比が増加してもほとんど変化はみ
られない。したがって本実験においては, Vent 比を
0.25 以上とし, 高負荷, 低負荷状態においても, Vent
比 0.25 を満足する $\Delta p = 56 \text{ mmHg}$ に維持した。

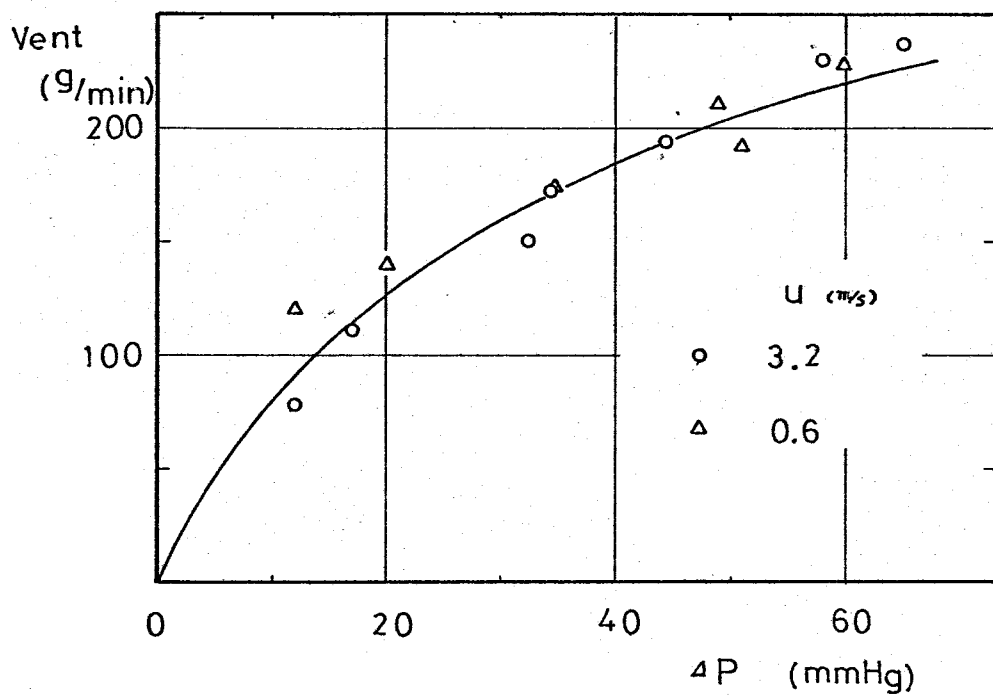


図 3.2 Vent 蒸気量の変化

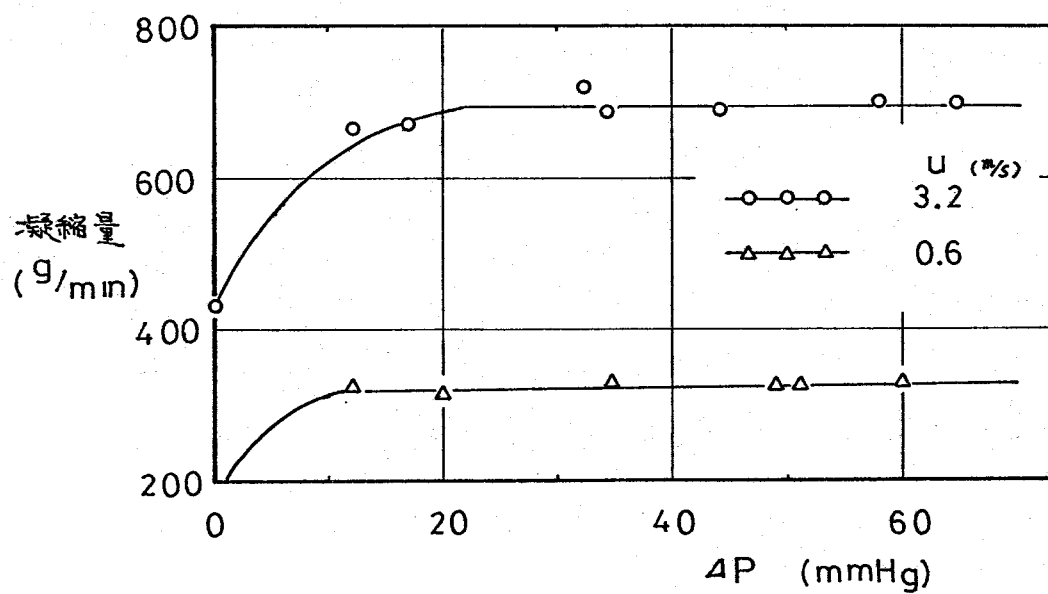


図 3.3 凝縮量の変化

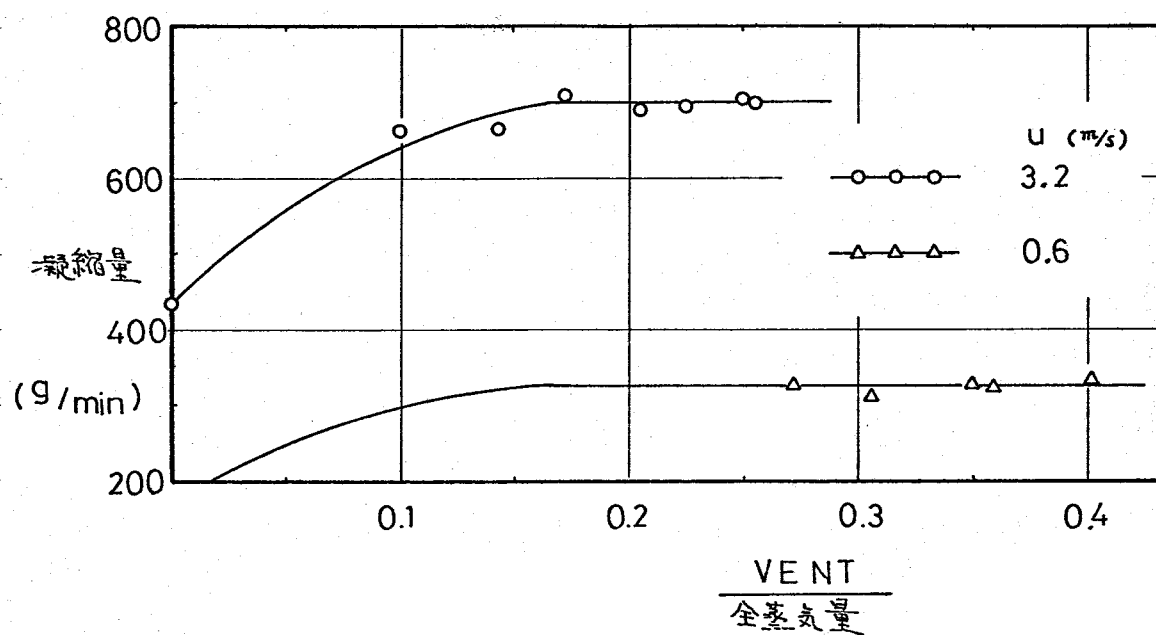


図 3.4 Vent比に対する凝縮量の変化

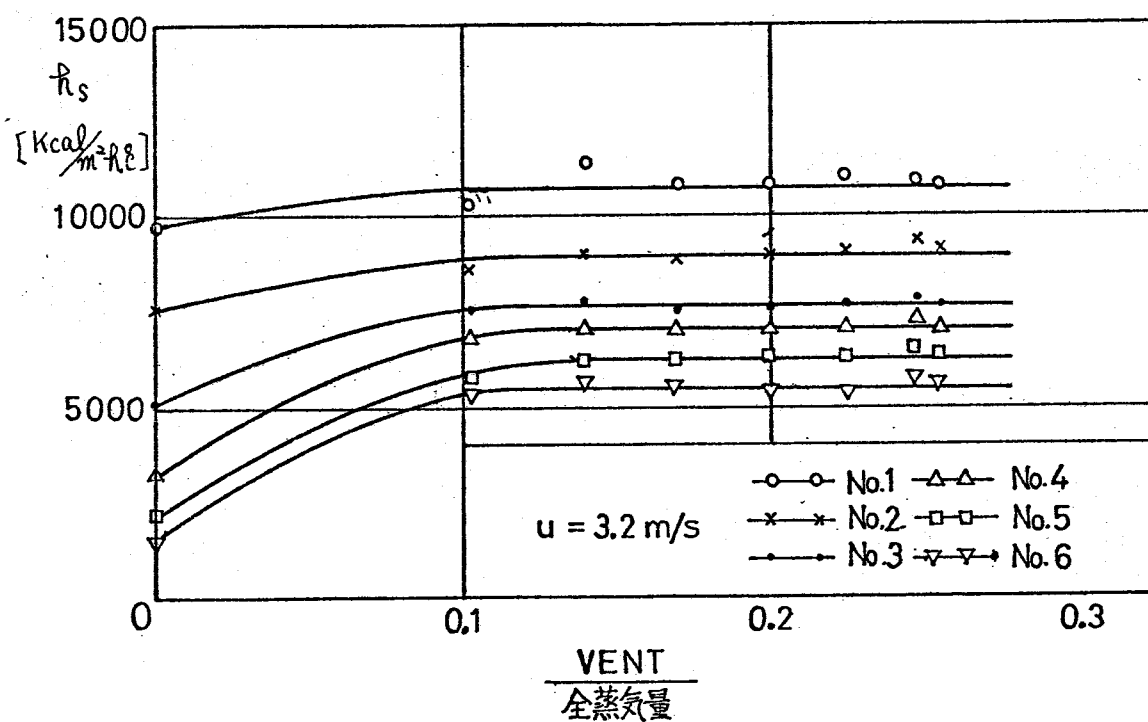


図 3.5, Vent比に対する蒸気側熱伝達率の変化

4. 管壁温度の測定

4.1 測定法

従来、凝縮熱伝達の実験では、比較的計測が容易な熱通過率 K を求め、冷却水側の熱伝達率 h_w が流速 u のほぼ 0.8 乗に比例することから、縦軸に $1/K$ を、横軸に $1/u^{0.8}$ をとり、図式的に蒸気側の熱伝達率 h_s や冷却水側の熱伝達率 h_w を算出する Wilson 法^[11] や、 h_w を適当な実験式で計算し、管の熱抵抗や、実験による熱通過率 K から蒸気側の熱伝達率を計算する方法^[12] を用いたものがある。しかし Wilson 法では $h_s \gg h_w$ の時のみ有効であり、 h_w が大きく h_s が小さい場合は誤差が大きく、又後者では水側の熱抵抗 $1/h_w$ が熱通過率に支配的な場合、すなわち $h_s \gg h_w$ では h_w の計算値と実際の値にわずかな差があっても h_s に大きな誤差を生じるおそれがある。したがって正確な熱伝達率 h_s を求めるには、管壁温度そのものを実測する必要がある。

管壁温度を実測するには、従来、温度計を付金録の図.1 のように取付け熱電対を構成させるか、直接伝熱表面近くに温度計を埋め込む方法が採用されている。

伝熱面に熱電対を適当な方法で直接に取付け、素線を器外に取出す方法は最も

簡単ではあるが、取付部の凝縮状況が変化したり、冷却水の流れに乱れを起すおそれがあり、又素線からの放熱あるいは吸熱により取付部の温度を正確に示さなくなることもある。肉厚の円管では端部から径 $0.5 \text{ mm} \sim 1.0 \text{ mm}$ の穴をあけ、ニース型、その他の熱電対を挿入し、熱流方向に幾つか設置した温度計により測定した温度分布から、外挿によって内外管壁温度を求める方法^{〔13〕}が採用されており、肉厚がそれほど厚くない場合には中心部温度と伝熱量から内外壁温度を求めうる。しかしこれらの方法は工作がかなり厄介で、測定実にも制限をうける、と同時に管の長さ方向に対しての局所的な表面温度しか測定できない。したがって平均の表面温度を得るためには、多数の温度計を設置することが必要となる。

表面温度を測定する他の方法に、金属の電気抵抗が温度によって変化する特性を利用し、抵抗を測定し逆に温度を求める方法がある。E. M. Baker^{〔14〕}、G. Selin^{〔15〕}はこの特性を利用して伝熱面温度を測定している。その方法は何れも伝熱部を含んでブリッジを形成させ、標準抵抗に対する試験冷却管伝熱部の抵抗変化をガルバノメータで測定する方法である。Baker は測定精

度も上げるために、直流発電機を使用し、150 Amp を、Selin は 10 Amp を加熱部に通電している。本実験ではこの抵抗値変化を利用する方法を採用して、1 Amp を通電し、測定区間の抵抗値を電圧変化から直接測定した。この方法によると装置本体と素線との電氣的絶縁等が必要となるが、他の方法より工作上においても、又精度においても十分に満足できる。

上述のような抵抗値変化による管温度の測定は管材料の電気抵抗変化が大きく、かつある規則性をもっているとき有利で、あらかじめその材料の温度と電気抵抗の関係を求めておけば実験時その電気抵抗を測定することによって管平均温度を求めることができる。一般に温度と電気抵抗との関係は次式〔16〕で表わされている。

$$R_T = R_0 (1 + a_1 T + a_2 T^2 + \dots + a_n T^n) \quad (4.1)$$

但し、 R_0 : 0°C のときの抵抗値

上(4.1)式において、温度係数 a_1, a_2, \dots が実験的に求まれば、任意長さの試験管の 0°C における R_0 と任意温度の抵抗 R_T との

比 R_T/R_0 から管の平均温度 T が求まる。

ここで R_0 は本実験のような場合には、コンデンサへの通気前に、常温の冷却水を相当な流速で通せば、水側の熱伝達率は、外部即ち管壁と大気間の熱伝達率よりはるかに大きいから、管の温度はほとんど冷却水温度と等しく、その時の冷却水温度 T と抵抗値 R_T から (4.1) 式により逆算すればよい。

実験に先立ってアルミ管の温度-抵抗変化を測定した。測定に使用した管は、試験冷却管と同じ管から切り取った長さ 500 mm のアルミ管で管表面に、管の平均温度測定用として、あらかじめ校正した銅-コニスタン温度計の本を張りつけ、抵抗の測定には試験冷却管と同様の配線し、1 Amp を通電し適当区間の温度変化による電位差変化を測定した。温度変化のための試験容器として恒温槽を使用し 10°C から 90°C まで約 12 点温度を変化させ各温度における抵抗を測定した。その結果を図 4.1 に示す、図のように抵抗値は温度によって、多少上向きの変化を示すが、実験に必要な範囲では、次式のように 2 つの直線で近似することができた。

10° ~ 50° では

$$R_T / R_{01} = 1 + 0.00402 T$$

50° ~ 100° では

$$R_T / R_{02} = 1 + 0.00427 T$$

(4.1)'

ここで R_{01} , R_{02} は仮想の 0° の抵抗であり、実際の 0° における抵抗を意味している。

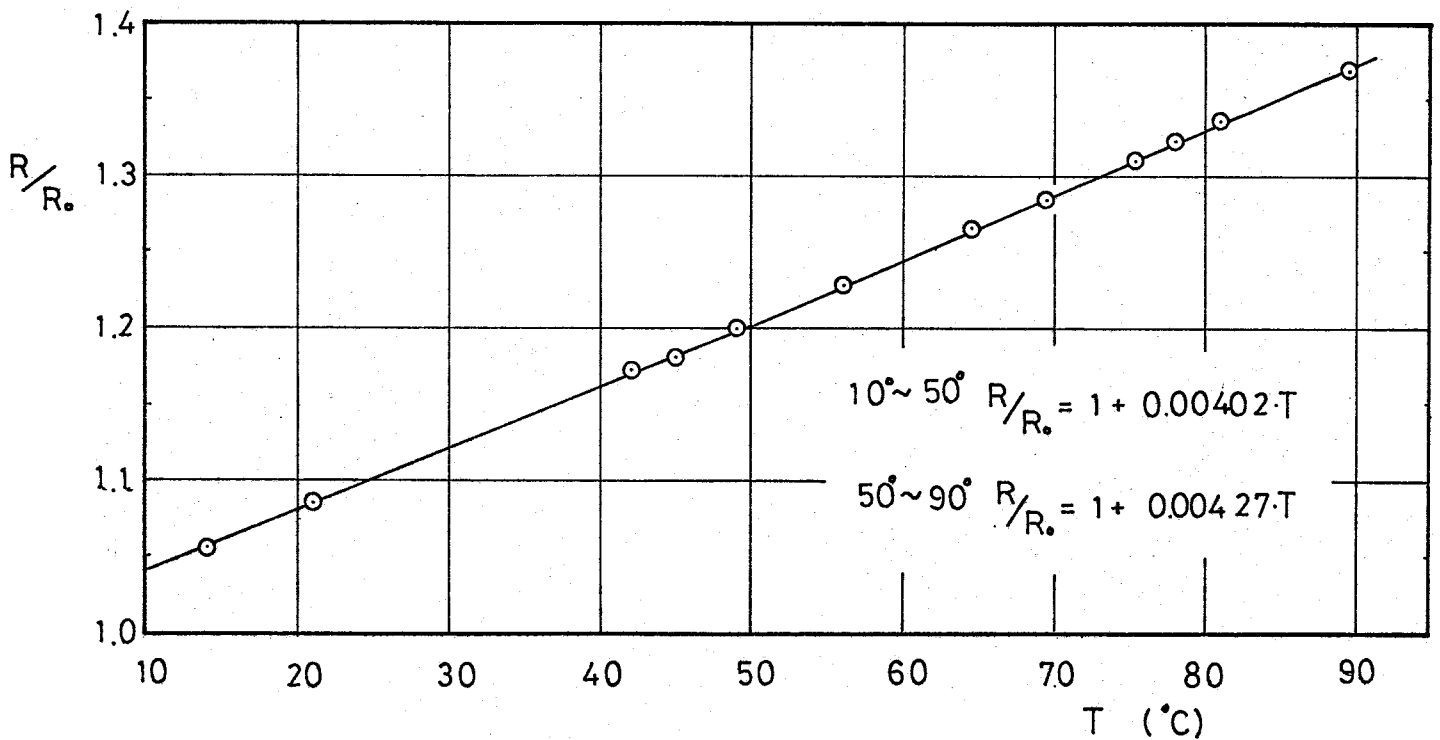


図 4.1 試験アルミ管の抵抗-温度曲線

4.2 抵抗計測用リード線を器外に取り付け たときの管平均温度の校正法

試験冷却管伝熱部の管平均温度を測定するには電位差測定用リード線を管の伝熱開始部と伝熱終了部に取り付け、器外に取り出さなければならぬ。伝熱部に接点を設けると伝熱状態を阻害するおそれがあり、リード線を器外に取り出す部分に特別な工作を必要とする。しかしリード線を器外部の適当な個所に取り付けることができれば、取付は簡単で伝熱状況を乱すおそれはない。ただ取付部分の実測し得る管平均温度 T_{m0} から伝熱部分の管平均温度 T_m を算出する必要がある。以下その計算方法について述べる。

まず理論計算による伝熱部の管の平均温度 T_m を求める。今回4.2において管の内、外径を d_1, d_2 , 蒸気温度を T_s , 入りから又々の冷却水温度を t , 近似的に管の半径方向の熱抵抗は無視できるとして、その管の温度を T_x , 単位伝熱面積当りの伝熱量, 蒸気側の熱伝達率, 冷却水側の熱伝達率を h_s, h_w とすると、図4.2のような伝熱部 I, II 間の微小区間 dx の熱平衡から、

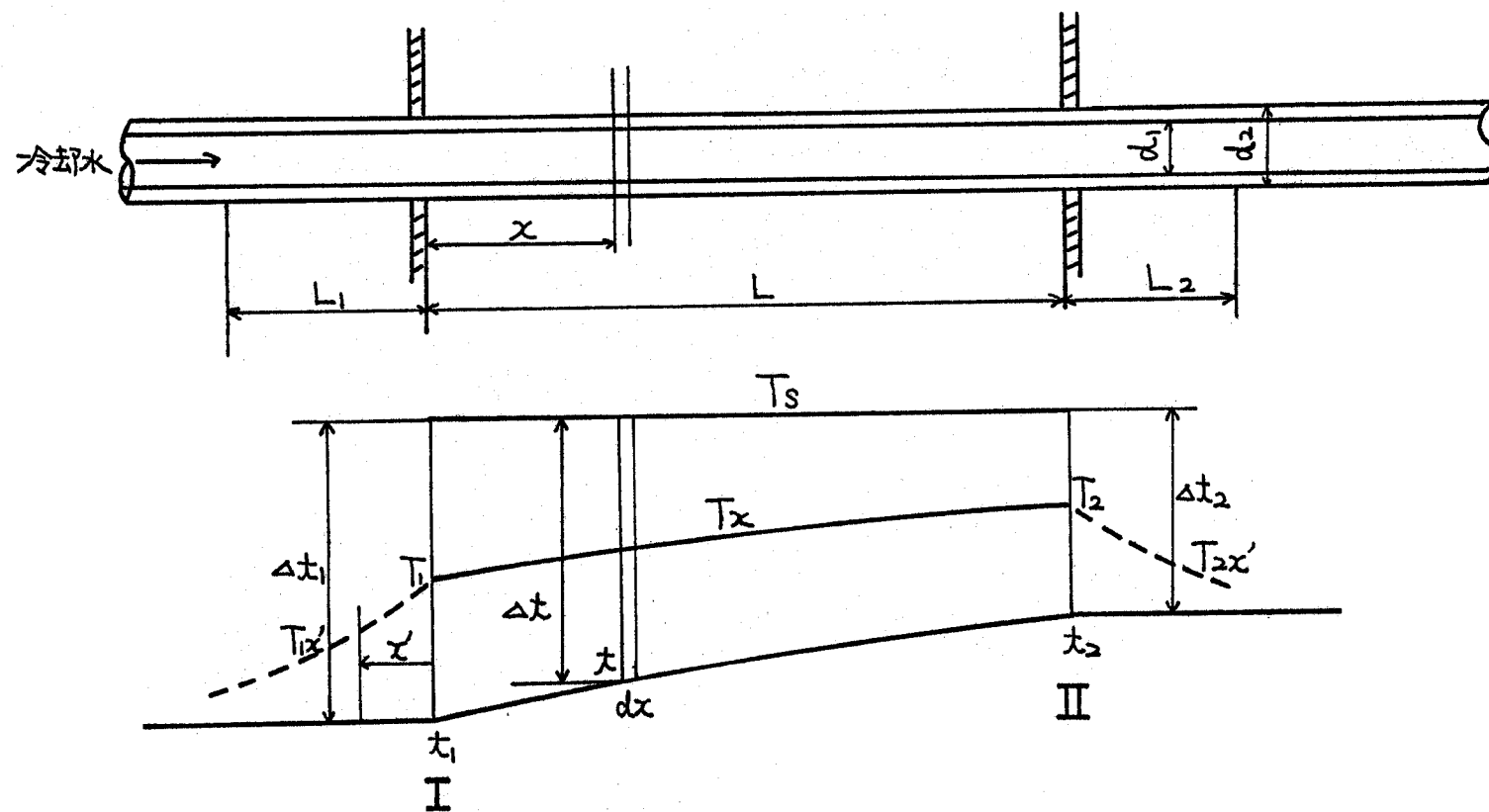


図 4.2 各部の温度変化

h_s, h_w を一定とすると

$$\begin{aligned} q \pi d_2 dx &= h_s (T_s - T_x) \pi d_2 dx \\ &= h_w (T_x - t) \pi d_1 dx \end{aligned}$$

したがって I, II 間の任意点 x における 管の温度 T_x は

$$T_x = \frac{h_s d_2 T_s + h_w d_1 t}{h_s d_2 + h_w d_1} \quad (4.2)$$

また, 熱通過率 K が一定であると, 冷却水の水当量を $W = G \times C = \text{流量} \times \text{比熱}$ として, 微小区間 dx の交換熱量 dQ を求めると

$$dQ = W dt = K \Delta t \pi d_2 dx \quad (4.3)$$

ここで $\Delta t = T_s - t$ であり, T_s は一定であるから

$$d\Delta t = -dt$$

したがって, (4.3) 式は次のようになる。

$$\frac{d\Delta t}{\Delta t} = - \frac{K \pi d_2}{W} dx$$

$$\therefore T_s - t = c e^{-\frac{K \pi d_2}{W} x}$$

境界条件

$$x=0 \rightarrow t=t_1$$

$$x=L \rightarrow t=t_2$$

から

$$T_s - t = (T_s - t_1) e^{-\frac{k\pi d_2}{W} x} \quad (4.4)$$

$$= (T_s - t_2) e^{-\frac{k\pi d_2}{W} (L-x)} \quad (4.5)$$

(4.2), (4.4) 式より x 点における管の温度 T_x

は

$$T_x = T_s - \frac{h_w d_1}{h_s d_2 + h_w d_1} (T_s - t_1) e^{-\frac{k\pi d_2}{W} x} \quad (4.6)$$

したがって伝熱部の管の平均温度 T_m は、管伝熱部の長さ x を L とすると、

$$\begin{aligned} T_m &= \frac{1}{L} \int_0^L T_x dx \\ &= T_s - \frac{h_w d_1}{h_s d_2 + h_w d_1} (T_s - t_1) \frac{W}{k\pi d_2 L} (1 - e^{-\frac{k\pi d_2 L}{W}}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

したがって (4.4), (4.5) 式より

$$k\pi d_2 L / W = \ln (T_s - t_1) / (T_s - t_2)$$

$$\therefore t_2 - t_1 = (T_s - t_1) \left(1 - e^{-\frac{k\pi d_2 L}{w}}\right)$$

したがって (4.7) 式は次のように書ける。

$$T_m = T_s - \frac{h_w d_1}{h_s d_2 + h_w d_1} \frac{t_2 - t_1}{\ln (T_s - t_1) / (T_s - t_2)} \quad (4.8)$$

次に器外の冷却される部分を含む管の平均温度 T_{mo} を求める。

装置入口 $x=0$, 出口端 $x=L$ における、管の温度を T_1, T_2 とすると (4.6) 式より

$$T_1 = T_s - \frac{h_w d_1}{h_s d_2 + h_w d_1} (T_s - t_1) \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} T_2 &= T_s - \frac{h_w d_1}{h_s d_2 + h_w d_1} (T_s - t_1) e^{-\frac{k\pi d_2 L}{w}} \\ &= T_s - \frac{h_w d_1}{h_s d_2 + h_w d_1} (T_s - t_2) \end{aligned} \quad (4.10)$$

のように求まり、この温度から試験管の両端の伝熱にあずからない部分、すなわち管の外方へ熱が移動し温度を低下させる。

管内に水が通るとき、管外が空気にはさまれる場合、水側の熱伝達率は管外の熱伝達率よりはるかに大となるので、管温度の降下は、管内冷却水側だけで行なわれると考えてよい。
したがって基礎の温度が T_1, T_2 である無限長

の棒の放熱とすることかでき、この部分の放熱量は管内での交換熱量に比べはるかに小さく、その数%に過ぎないので冷却水温度は一定と見てもよい。

今入口側を考えると図 4.2 の基礎 I から外側への任意の距離 x' における管の温度を $T_{1x'}$ 、管の熱伝導率を k_a 、管の断面積を $A = \pi/4 \cdot (d_2^2 - d_1^2)$ とすると、微小区間 dx' の熱平衡から次式が得られる。

$$-k_a \left(\frac{dT_{1x'}}{dx'} \right)_{x'} \cdot A = h_w (T_{1x'} - t_1) \pi d_1 dx' - k_a \left(\frac{dT_{1x'}}{dx'} \right)_{x+dx} A$$

$$\therefore \frac{d^2 T_{1x'}}{dx'^2} - \frac{h_w \pi d_1}{k_a A} (T_{1x'} - t_1) = 0$$

$m^2 = h_w \pi d_1 / k_a A$ と置き、上式を解き、境界条件として $x=0 \rightarrow T_{1x'} = T_1$, $x=\infty \rightarrow T_{1x'} = t_1$ とすると

$$T_{1x'} = (T_1 - t_1) e^{-mx'} + t_1$$

T_1 に (4.9) 式を代入すれば

$$T_{1x'} = (T_s - t_1) \left(\frac{h_s d_2}{h_s d_2 + h_w d_1} \right) e^{-mx'} + t_1 \quad (4.11)$$

出口側も同様にして管外任意位置の管の温度は

$$T_{2x'} = (T_s - t_2) \left(\frac{h_s d_2}{h_s d_2 + h_w d_1} \right) e^{-mx'} + t_2 \quad (4.12)$$

となる。したがって、器外にリード線を取り付けた時の伝熱部の両端から取り付け部までの入り側、出口側までの距離を L_1, L_2 とすると、リード線取付部区間の平均温度 T_{m0} は

$$\begin{aligned}
 T_{m0} &= \frac{1}{L_1 + L + L_2} \left\{ \int_0^{L_1} T_{1x'} dx' + L T_m + \int_0^{L_2} T_{2x'} dx' \right\} \\
 &= \frac{1}{L_1 + L + L_2} \left[L T_m + L_1 t_1 + L_2 t_2 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{m} \frac{h_s d_2}{h_s d_2 + h_w d_1} \left\{ (T_s - t_1)(1 - e^{-mL_1}) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + (T_s - t_2)(1 - e^{-mL_2}) \right\} \right] \quad (4.13)
 \end{aligned}$$

のように求められる。

器内の熱交換が行われる部分の管の平均温度 T_m と器外の冷却される部分を含む管の平均温度 T_{m0} の比 $\phi = T_{m0} / T_m$ は (4.8) (4.13) 式から各部分の長さ、管の内径、熱伝導率、冷却水流量、冷却水出入口温度、蒸気温度、蒸気、水側の熱伝達率が分かれば求められる、また ϕ が分かれば実際に T_{m0} より伝熱部の管の平均温度 T_m が求められる。

中の計算に当たっては熱貫流率 K は、実際に冷却水量、冷却水入り、出口温度から計算でき、水側の熱伝達率 h_w は実験条件から、従来使用されている実馬式、例えば Dittus-Boelter

の式を用いて算出できる。また蒸気側の熱伝達率 h_s は先に求めた K と管の熱抵抗より計算すればよい。このようにして求めた h_w, h_s が実際の値と多少違っても付録の図10に示すようにそれらが中に与える影響は少ない。もしこのようにして得た中と実際の T_{m0} から得た T_m を使用して求めた h_w, h_s の値が先の中を求めるときに使用した h_w, h_s と余りに差が大きければ、この新しい h_w, h_s を使用し前の手続をくり返し計算を行えばよい。

4.3 管の内・外表面温度

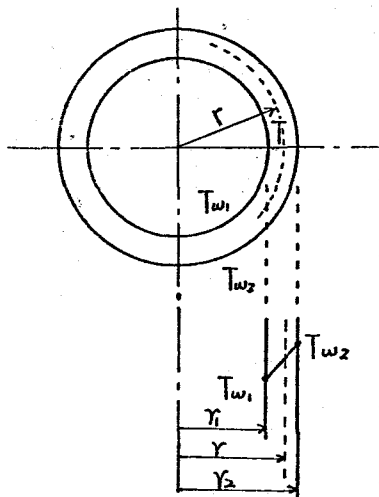


図4.3

上述のごとく、実験による管の平均温度 T_m が求めれば、次のようにして管内外の表面温度 T_{w1}, T_{w2} を求めることができる。

いま図4.3のように任意半径 r における管の温度を T とし、比熱、比重量をそれぞれ c, γ とすると

$\pi(r_2^2 - r_1^2) L \rho c T_m = \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr L \rho c T$
 となり, 今 比熱, 比重量 を一定 とすると

$$(r_2^2 - r_1^2) T_m = \int_{r_1}^{r_2} 2T r dr \quad (4.14)$$

内管の半径方向にだけ, 一様に熱が流れると
 すると, 半径 r の内筒面を単位時間に通過
 する熱量 Q は

$$Q = k_a \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi r L$$

$$\therefore dT = \frac{Q}{2\pi k_a L} \frac{dr}{r}$$

境界条件を $r=r_1 \rightarrow T=T_{w1}$, $r=r_2 \rightarrow T=T_{w2}$
 として上式を積分すれば

$$T = \frac{Q}{2\pi k_a L} (\ln r - \ln r_1) + T_{w1} \quad (4.15)$$

$$= \frac{Q}{2\pi k_a L} (\ln r - \ln r_2) + T_{w2} \quad (4.16)$$

(4.14)式に (4.15)式を代入し整理すると

$$T_{w1} = T_m + \frac{Q}{2\pi k_a L} \left\{ \frac{1}{2} - r_2^2 \frac{\ln r_2/r_1}{r_2^2 - r_1^2} \right\} \quad (4.17)$$

また同様に (4.16)式から

$$T_{w2} = T_m + \frac{Q}{2\pi k_a L} \left\{ \frac{1}{2} - r_1^2 \frac{\ln r_2/r_1}{r_2^2 - r_1^2} \right\} \quad (4.18)$$

が得られ、交換熱量 $Q = W(t_2 - t_1)$ 、及び算出した管平均温度 T_m より、管表面温度 T_{w1} , T_{w2} を求めることができる。

本実験はアルミ管を使用し、その試験冷却管は $d_2 = 0.012$ m, $d_1 = 0.01$ m, $k_a = 176$ kcal/m²h²°C, $L = 0.303$ m とあるから (4.17), (4.18) より、次のように求められる。

$$T_{w1} = T_m - \frac{Q}{3466} \quad (4.17)'$$

$$T_{w2} = T_m + \frac{Q}{3913} \quad (4.18)'$$

5. 実験結果 及び 考察

P78 表 1 ～ 表 4.2 に 実験値 及び その 計算結果を
示す。

5.1 単一水平管の凝縮熱伝達

凝縮熱伝達は蒸気流速の影響により、体積力対流凝縮、共存対流凝縮 及び 強制対流凝縮に分けることができる。

体積力対流凝縮は蒸気流速が小さく、液膜に力がかまとして体積力である場合、強制対流凝縮は蒸気流速が非常に大きく、液膜の運動がまとして、蒸気のせん断力に起因する場合、共存対流凝縮はこの中間の場合である。

藤井^[17] 5 に よれば、円管の場合その各領域は

$$0.1 > 3.6 X_2^4 Fr_d H / Pr_L \quad \text{体積力対流領域}$$

$$0.1 < 3.6 X_2^4 Fr_d H / Pr_L < 10 \quad \text{共存対流}$$

$$10 < 3.6 X_2^4 Fr_d H / Pr_L \quad \text{強制対流}$$

$$\text{但し } X_2 = 0.9 (1 + Pr / R_H)^{1/3}$$

$$R : \text{Pr 比} \quad (P_L \mu_L / P_V \mu_V)^{1/2}$$

$$H : \text{顕熱代替比} \quad c_{pL} (T_s - T_{w2}) / \lambda$$

$$Fr_d : \text{フルード数} \quad u_\infty^2 / g d_2$$

であるとしている。

本実験において実験時の最上部の管への蒸気流速 U_{∞} を求めると、最低負荷のとき約 1.0 m/s 、最高負荷のとき 2.5 m/s であるので上式に代入すると

$$0.34 < 3.6 \times 10^4 \text{ Fr}_D H / \text{Pr}_L < 5.0$$

となり、共存対流領域となるが、共存対流=凝縮についてはその解析において、藤井ら自身も述べているように不明なところがあり、また詳細は明らかでないが、その実験結果^[13]でも蒸気流速が 20 m/s までは、その影響は明確ではない。又 Boeck^[18]によれば蒸気流速 20 m/s までは静止状態とみよせるとしていき、今回の Vent 量決定の実験でも述べたように Vent 量がある一定量以上になれば、実験範囲内では流量を変化しても熱伝達率にほとんど影響がみられない。したがって以上のことから本実験においては、器内蒸気は静止蒸気として取扱ひ実験結果の検討考察をおこなった。

単一水平管の凝縮熱伝達の解析的研究は Nusselt^[1]により初めておこなわれ、その後現在まで境界層理論により、体積力対流、共存対流、強制対流凝縮熱伝達の研究が色々とおこなわれ、解析解、または数値解が求められている。しかしそれらのうち体積力対流における解は Nusselt の解をわずかに修正する程度に過ぎない。従って

本実験は以下に述べる Nusselt 理論をもとに考察した。

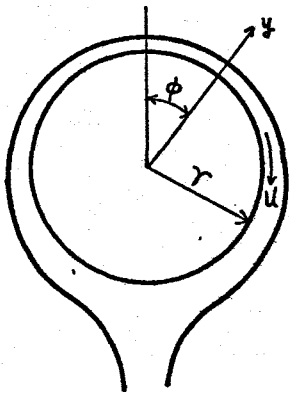


図5.1 Nusselt モデル

Nusselt は 図 5.1 のような水平管において凝縮液と蒸気界面のせん断力を無視し、又液膜は非常に薄いので、落下速度も小さくその慣性力も無視できるとすると、液膜に働く重力と摩擦力の平衡から、円管表面上の液膜の平均流速 u_m は、粘性係数を μ 、比重量を ρ とし、液膜の厚さを γ とすると、

$$u_m = \frac{\rho \sin \phi}{3\mu} \gamma^2 \quad (5.1)$$

又気液界面の熱抵抗および液膜内の対流を無視し、壁面温度を一定とすると、微小区間の熱平衡から

$$d\left(\frac{q}{z}\right) = \frac{k(T_s - T_{w2}) r d\phi}{\gamma} = \rho \lambda d(u_m \gamma)$$

となり $B = 3\mu k r (T_s - T_{w2}) / \rho^2 \lambda$ とすれば
上式は

$$B d\phi = \gamma d(\gamma^3 \sin \phi) = \frac{3}{4} \sin \phi d\gamma^4 + \gamma^4 \cos \phi d\phi$$

となる、そこで $\psi^4 = \gamma^4 / B$ とおくと

$$\gamma = \psi \sqrt[4]{\frac{3\mu k r (T_s - T_{w2})}{\rho^2 \lambda}} \quad (5.2)$$

$$\psi = \frac{4}{3 \sin^{4/3} \phi} \int_0^\phi \sin^{1/3} \phi d\phi$$

となる。

局所熱伝達率を h とすると

$$h(T_s - T_{w2}) r d\phi = k(T_s - T_{w2}) r d\phi / Y$$

なので上式を 0 から π まで積分し、内管の平均熱伝達率 h_s を求めると

$$h_s = 0.725 \sqrt[4]{\frac{r^2 \lambda k^3}{\mu d_2 (T_s - T_{w2})}} \quad (5.3)$$

となる

McAdams^[2] は 1922~41年の間におこなわれた、水、及び有機物質に関する実験結果と Nusselt の解とを比較し、水では平均 +23%、有機物質では -6% の結果を得ている。又藤井^[3] によれば、Baker-Mueller, Othmer などの実験結果を整理し、Nusselt の解の $\pm 30\%$ の範囲にあるとしている。

実験では蒸気側の熱伝達率 h_s を蒸気温度 T_s と蒸気側の管壁温度 T_{w2} との差で定義し、4章で述べた管の平均温度 T_m から T_{w2} を求め次式で算出した。

$$h_s = \frac{Q}{\pi d_2 L (T_s - T_{w2})} \quad (5.4)$$

図5.2 は本実験における ϕ 1 管列の結果を示したものであり、 ϕ 1 管列では上部からの凝縮の蒸下があるので単一水平管における凝縮とみなすことができる。図中細線は Nusselt の (5.3) 式であって、実験値は Nusselt 理論値より約 20% 高く、従来の化負荷とほぼ一致している。しかし蒸気温度と

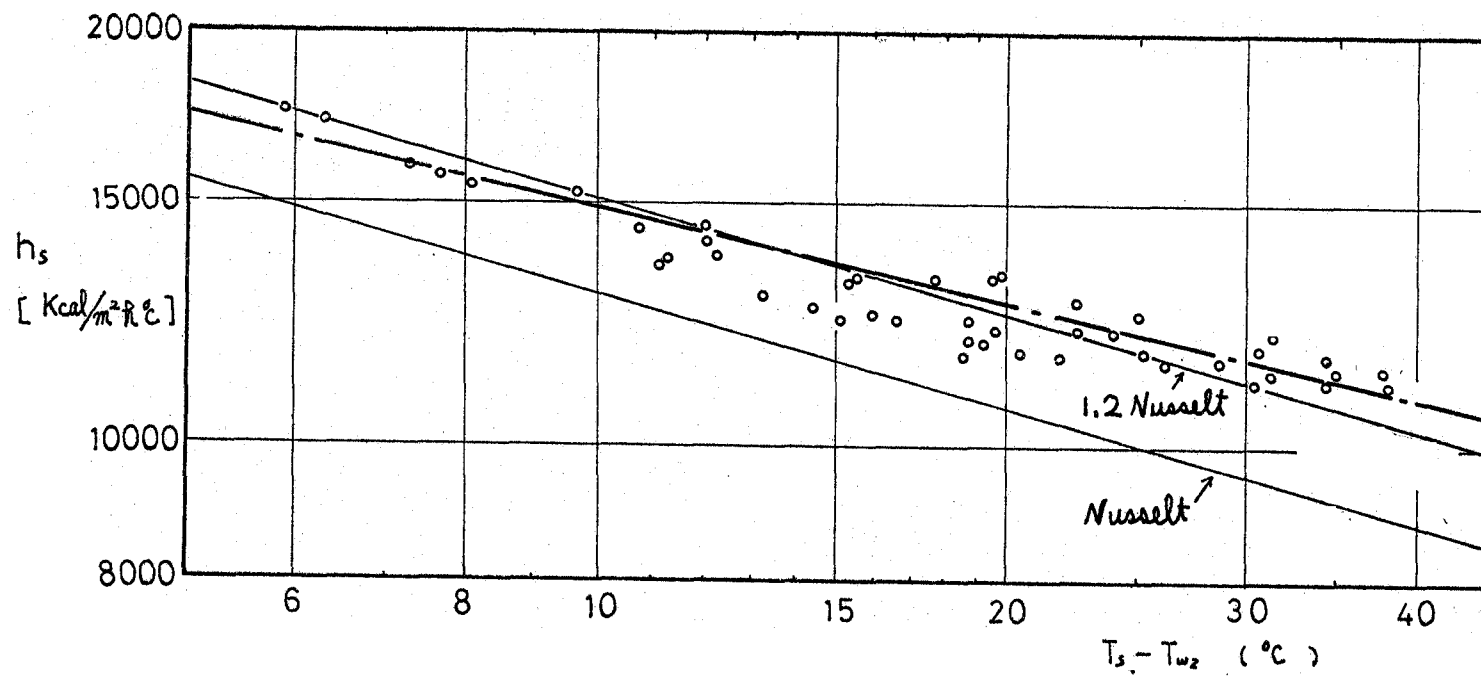


図 5.2 単一水平管の凝縮熱伝達率

管壁温度との差 $T_s - T_{w2}$ 即ち熱負荷が大きくなるにつれて $Nusselt$ 理論との差が大きくなり、 $T_s - T_{w2}$ が小さいと $Nusselt$ 理論に近づく傾向がある。

$Nusselt$ 理論では、図5.1のモデルにも示すように、内管表面上の液膜は表面に沿って層流で流れ、内管下部で無限厚さを持つことになる。この断面の形状は管の長さ方向にわたって均一であると考えている。しかし実際の液膜の挙動は写真a, b及び図5.3のスケッチに示すように内管下部では有限

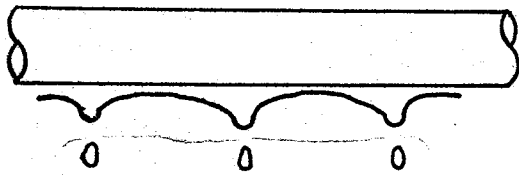


図5.3 凝縮液滴の
滴下状況

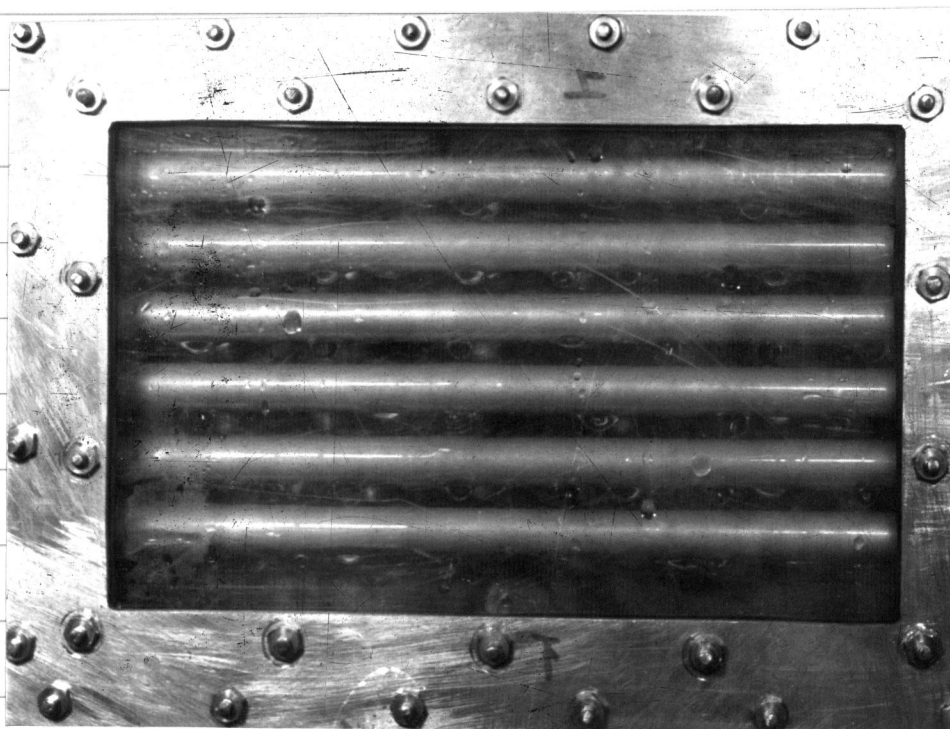
で管の長さ方向に液打っており、その幾つかの点で滴も生成し、零のようには滴下している。しかも滴の生成場所および滴の大きさは観察したかぎりでは、熱負荷の大小によ

って余り変わらず、大きくなると滴下数が増加して来るように見受けられる。これらの状況は山中^[19]、や藤井^[20]らによっても認められている。

これらの状況から滴下頻度の多い、高熱負荷時には液膜の乱れを起しやすく、層流と考えた $Nusselt$ の値との差が大きくなる傾向を持ち、低熱負荷時には層流理論に近く、 $Nusselt$ の値に近接して来るのではないかとと思われる。



(a) 冷却水流速 0.6 m/s



(b) 冷却水流速 3.0 m/s

5.2 冷却水側の熱伝達

冷却水側の熱伝達率については、多くの研究者により研究が行なわれている。管内の発達した乱流に対しもっとも一般的なものに次の Dittus-Boelter^[7] の式がある。

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5.5)$$

式は、 $10000 < Re < 120000$ 、 $0.7 < Pr < 120$ 、 $L/d > 60$ で流体と壁の温度差が余り大きくなく壁温一定とみなせる場合に適用でき、流体と壁の温度差が大きいときは熱伝達率を低く見積り過ぎると言われている。

Allen - Eckert^[8] は円管内で速度境界層が発達した Pr 数が 7 及び 8 の水が一定熱負荷の下で加熱されるときの加熱部分からの局所熱伝達率について計測を行ない、温度軸走区間での熱伝達率の変化、および温度境界層の発達後の熱伝達率を求めている。図 5.4^[8] は同論文に示されている Allen - Eckert、および 3 名の研究者の実験結果を Dittus - Boelter の式と比較したものであり、どれも Dittus - Boelter 式より大きくでている。図中 Hartnett の曲線は壁と流体との温度差が小さい時の測定結果で Allen - Eckert の値より Dittus - Boelter 式に近い値を示している。

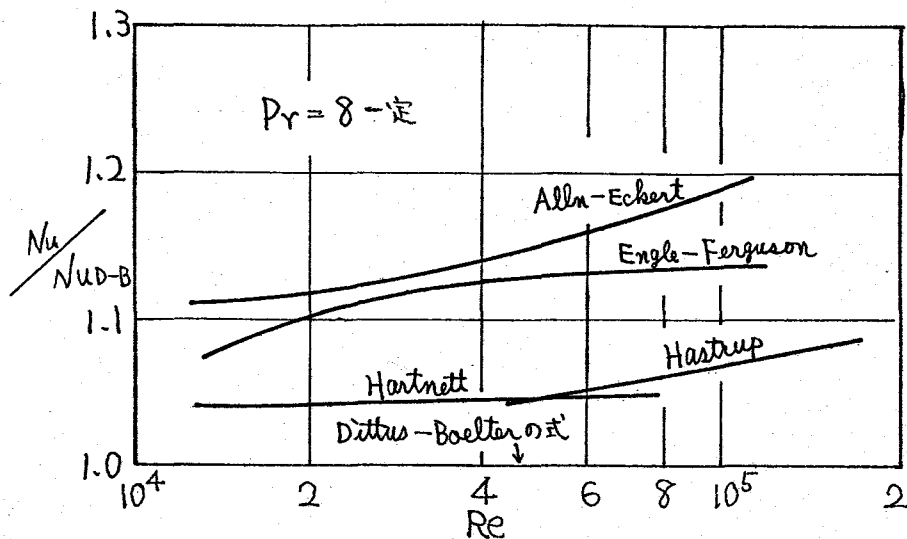


図 5.4 Allen - Eckert の論文 [8]
の挿入図。

T.F. Provan^[21] は Allen - Eckert の結果を物性値の異なる場合にも満足できるようにし、ヌセルト数による影響をも加味して、次式のように拡張し、流体と壁との温度差が大きい場合に満足できるように温度助走区間の熱伝達率への影響についても Allen - Eckert の実験結果から次のように求めている。

温度境界層が発達した流れに対して

$$Nu = 0.00123 Re Pr^{0.42} (1 + 25 Re^{-0.27}) \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^m \quad (5.6)$$

但し

$$\begin{aligned} Re &\leq 62500 & m &= (Re/870000)^{0.84} \\ Re &> 62500 & m &= 0.11 \end{aligned}$$

温度助走区間に対しては，補正係数を C_L ，この区間の平均熱伝達率を \bar{h}_w ，平均 Nusselt 数を $Nu_L = \bar{h}_w d_1 / k$ とすると

$$Nu_L = C_L Nu \quad (5.7)$$

$$\text{但し} \quad C_L = 1 + \frac{0.96 (7/Pr)^{0.42}}{L/d_1}$$

としている。

Allen - Eckert の実験結果によれば，局所熱伝達は $L/d_1 > 30$ で温度助走区間の影響は小さく， $L/d_1 < 60$ 以内では平均の熱伝達率にその影響が残ると言われている。本実験は伝熱部の L/d_1 が 30.3 なので，伝熱部まで完全に速度境界層が発達していても，伝熱部の冷却水側の平均熱伝達率には温度助走区間の影響が残ると思われる。

冷却水側の熱伝達率 \bar{h}_w は，従来整理されているように，管壁温度と冷却水入口、出口温度との対数平均温度差で定義し，4章で述べたように実験した管の平均温度 T_m から得た冷却水側の管壁温度 T_{w1} と冷却水入口、出口温度 t_1, t_2 から次式を用いて求めた。

$$\begin{aligned} \bar{h}_w &= \frac{Q}{\pi d_1 L} \frac{\ln (T_{w1} - t_1) / (T_{w1} - t_2)}{t_2 - t_1} \\ &= \frac{G C}{\pi d_1 L} \ln \frac{T_{w1} - t_1}{T_{w1} - t_2} \quad (5.8) \end{aligned}$$

上(5.8)式で求めた h_w と実験で得られた 熱通過率 k , (5.4)式で得た 蒸気側熱伝達率 h_s から次式で求めた h_w

$$h_w = \frac{d_2}{d_1} \left\{ \frac{1}{k} - \left(\frac{1}{h_s} + \frac{d_2 - d_1}{2ka} \right) \right\}^{-1}$$

この相違はわずか 0.2~0.3 % に過ぎず, ほとんど同一とみられてよい。

実験結果を図 5.5 に示す。

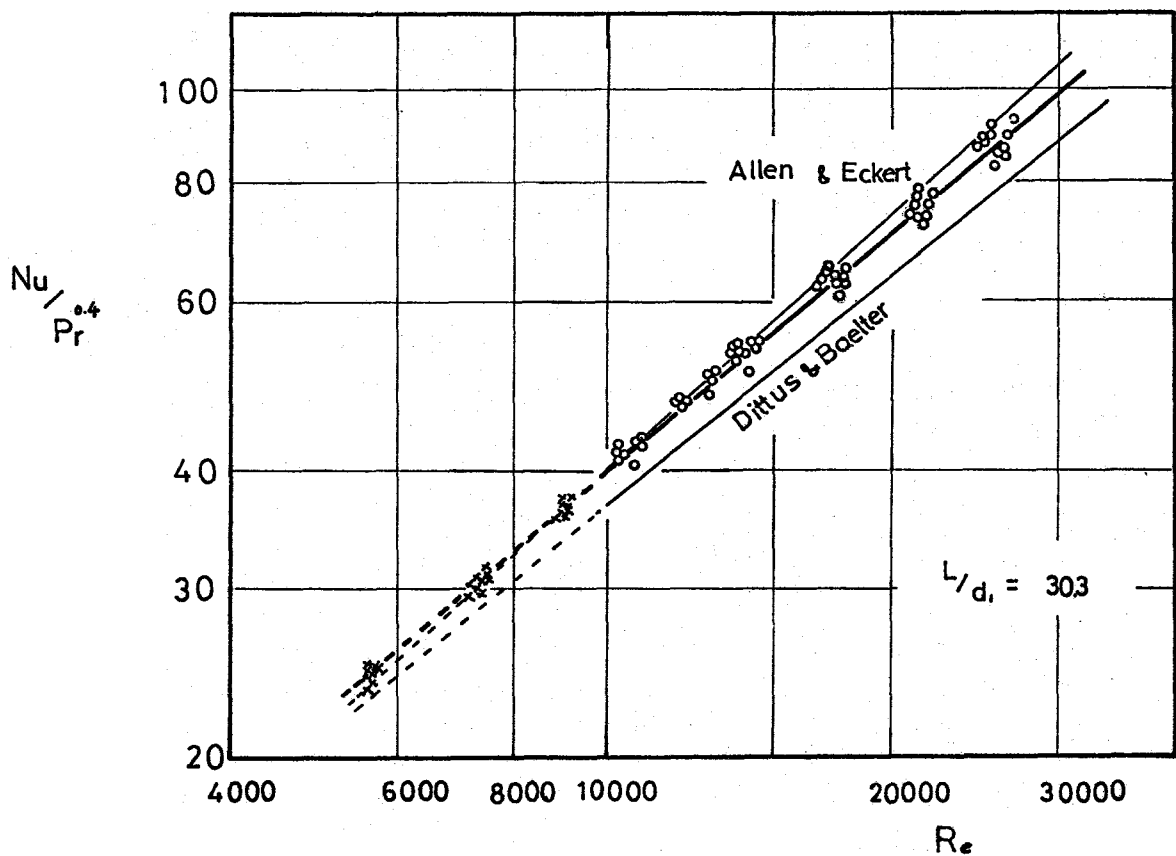


図 5.5 冷却水側の熱伝達率変化の無次元表示

横軸に Re 数 をとり、たて軸に $Nu/P_r^{0.4}$ をとって Re 数 に対する熱伝達率の変化を示した。図中細線は (5.5) (5.6) 式から求めた Dittus - Boelter, Allen - Eckert の値であり、実験値は Dittus - Boelter (5.5) 式の約 10% 増となり、実験範囲では Allen - Eckert (5.6) 式に近い値をとり、 Re 数の 0.8 乗に比例し Dittus - Boelter 式の傾向に近い。前述の温度助走区間の補正を考えれば、実験範囲では $C_L \approx 1.03$ となり、温度境界層の発達した、流れに換算した本実験値は Dittus - Boelter 式の約 7% 増となる。

H. Hampson^[12] は L/d_2 が 24.7 ~ 96 の実験装置で行なった凝縮熱伝達実験では冷却水側の熱伝達率を Dittus - Boelter 式の 6% 増しに取っていて、この 7% 増とほぼ一致する。又 (5.6) 式における粘性補正項を考えに入れると、実験範囲では 1.024 ~ 1.042 であり、温度助走区間と粘性補正を考えた場合の補正值は 1.055 ~ 1.073 となり、これを含めた Dittus - Boelter 式は実験値に近くなり、ほぼ 3 ~ 4% 実験値が高くなる。

したがって流体と壁との温度差が大きく、熱負荷一定に近い場合は Allen - Eckert (5.6) 式で冷却水側熱伝達率を求める方がよいか、温度差がそれ程大きくない時は Dittus - Boelter (5.5) 式

を用いても余り大きな誤差は生じない。ただし Dittus -
Boelter 式の適用には、速度、温度助定区間の影響
を考えに入れ、同時に粘性の補正も考えた方がよい。

5.3 管列における凝縮熱伝達

実用の復水器及び熱交換器では、多数の冷却管が千鳥又は碁盤目状に配列されており、このような管群ではその外表面における凝縮熱伝達は上部管からの凝縮液の滴下の影響や蒸気流速の大小、管群が上下に多数配列されている時には上部と下部の蒸気流速の違い等の影響も加わって非常に複雑となる。上部管からの滴下の影響は管配列の方式によっても異なり、垂直管列や、Ginabat^[6]配列等についての解析、実験が起行されているが、解析したモデルと実際現象との違いや、漏入空気の影響、凝縮熱伝達では、各部の熱抵抗が小さい事によって普通以上に精度の高い測定が要求されることなどから不明な点が多い。

本実験では2章に述べたように6管列の冷却管を垂直に配列し、上記の不明な点を解明するように試みた。

一般にこのような垂直配列では、2列目以下の管列に上部管列からの凝縮液が滴下して加わり、液膜が厚くなるため、下部管列に行くに従い熱伝達率は低下する。

Nusseltは図5.6のようなモデルを考え、 θ_1

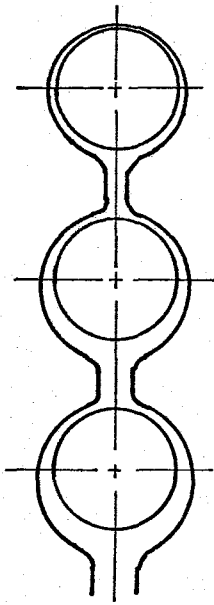


図 5.6
Nusselt
モデル

管列で形成された液膜が膜状のまま次の管列の頂部に達し、その管の液膜に連続的につながり、以下液膜が最下立端の管まで切れ目なくつながるとして解析を行っている。その解析の結果によると n 列目の円管の平均熱伝達率を h_{sn} 、頂部第 1 列の円管の平均熱伝達率を h_{s1} とすれば

$$h_{sn}/h_{s1} = n^{3/4} - (n-1)^{3/4} \quad (5.9)$$

で表わされ、 n 本の円管全体の平均熱伝達率 \bar{h}_{sn} は

$$\bar{h}_{sn}/h_{s1} = n^{-1/4}$$

となる。

実験結果を図 5.7, 図 5.8, 図 5.9, 図 5.10 に示す。

図 5.7 は横軸に蒸気と管壁との温度差 $T_s - T_{w2}$ を、たて軸に各管列の蒸気側の熱伝達率 h_s をとり、管内冷却水流速をパラメータとして、各管列の負荷による熱伝達率の変化を示したものである。図でもわかるように冷却水流速を一定とすると、各管列の管壁温度は下部管列になるに連れて低下している。その管壁温度の低下割合は冷却水流速の増加、すなわち

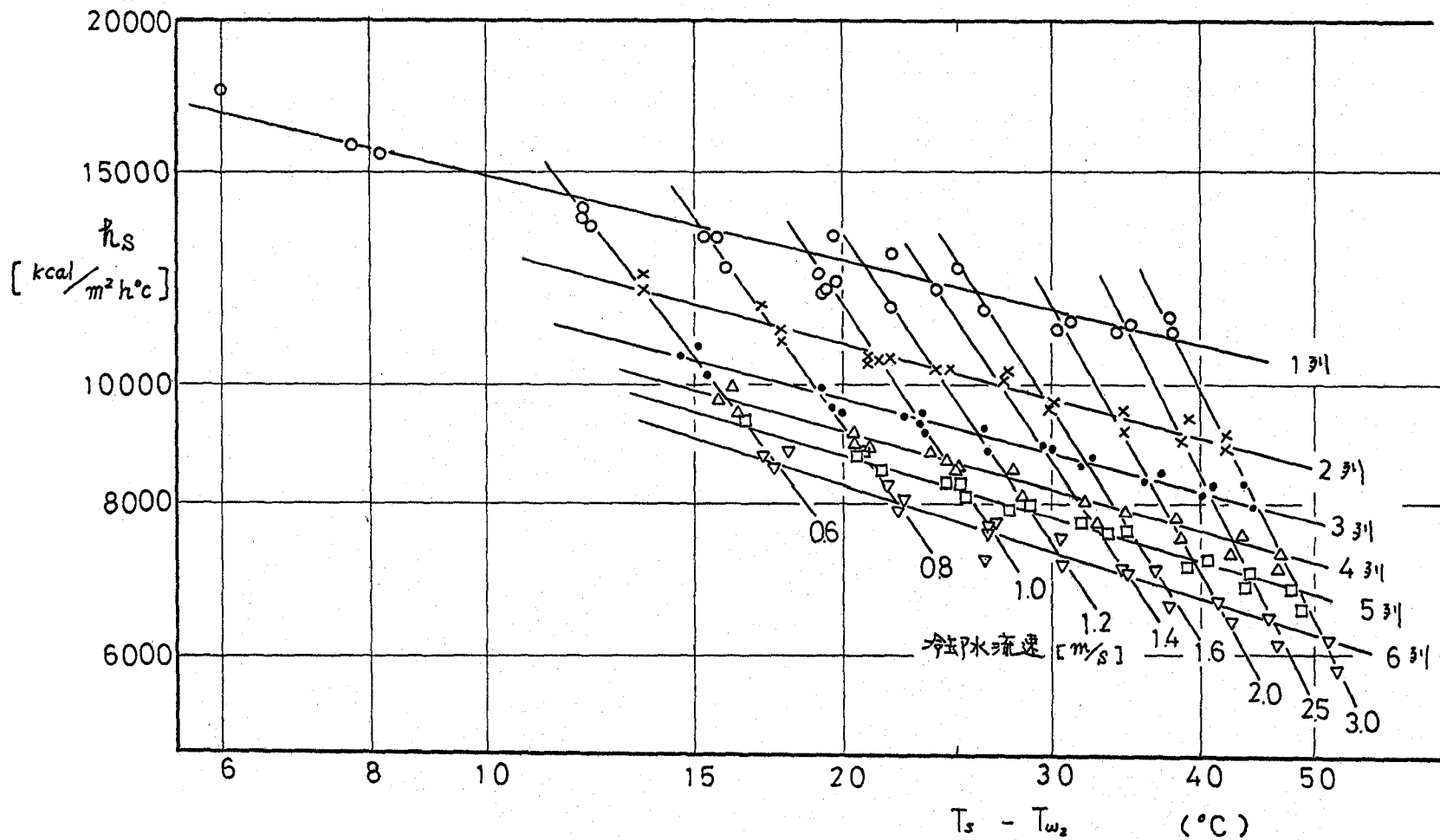


図5,7 垂直6管列の蒸気側熱伝達率
(水平配置 冷却水流速一定)

熱負荷の増加にともない増加する。Nusseltの理論では各管列の管壁温度を一定として解析を行っている。本実験での管内流速を一定としたときの凝結速度では常に下部管列に与えるに十分な管壁温度は低下するので、Nusseltの理論よりも各管列の凝結量は増大してくる。その増加割合は熱負荷によって異なるので、下部管列への影響も熱負荷によって異なる。

図5.8に1管列の熱伝達率に対する n 列目の熱伝達率の比を示した。図中(a)は冷却水流速 1 m/s , 平均熱負荷 $q = 2.16 \times 10^5 \text{ [Kcal/m}^2\text{h]}$ (b)は 2 m/s , $q = 3.06 \times 10^5$, (c)は 2.5 m/s , $q = 3.34 \times 10^5$ (d)は 3.0 m/s , $q = 3.57 \times 10^5$ の時の実験値を示したものであり、この図によれば

$$h_{sn} / h_{s1} = n^{-m} \quad (5.10)$$

と表わすことができ、その指数 m は図中に示す通りで、(a)では $1/4.06$ (b)では $1/3.46$ (c)では $1/3.26$ (d)では $1/3.04$ となる。

Berman^[4]によれば(5.10)式の指数は0.07で、熱負荷が大きくなると0.12~0.15程度大きくなることもあるとしている。本実験においてはほとんど静止蒸気中の実験と考えられるので、蒸気

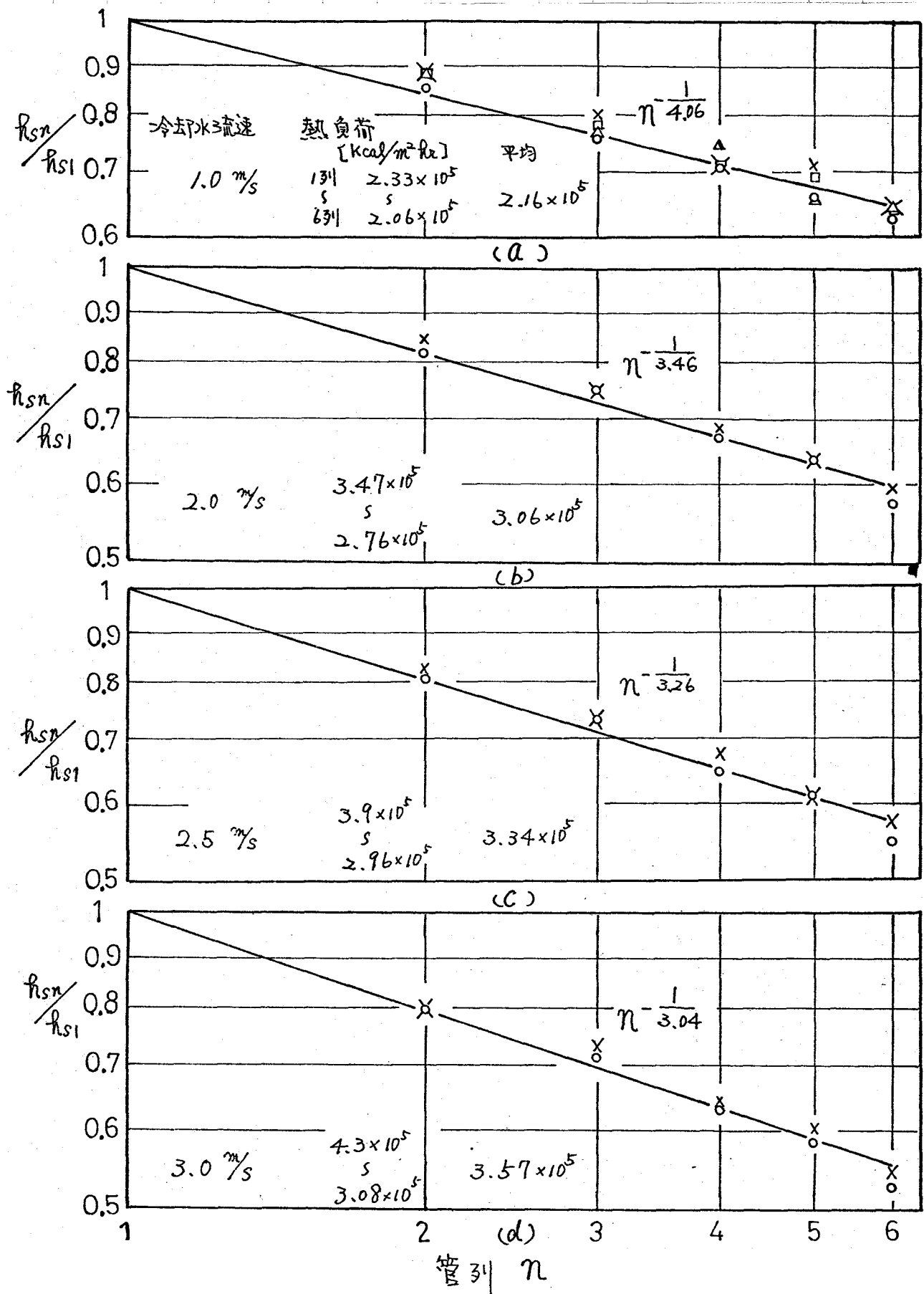


図 5.8 第1管列に対する n 列目の熱伝達率比の変化 (冷却水流速一定)

流速の影響は小さく、熱負荷の増加にともない上部管列からの凝下凝縮液が増加するため下部管列の管壁温度の低下が大きいと熱伝達率が低下するものと思われる。

この凝下凝縮液の影響をさらに詳しく調べるため、各管の凝縮量を一定とするように熱負荷を一定とした実験を行ないその結果を図5.9に示した。

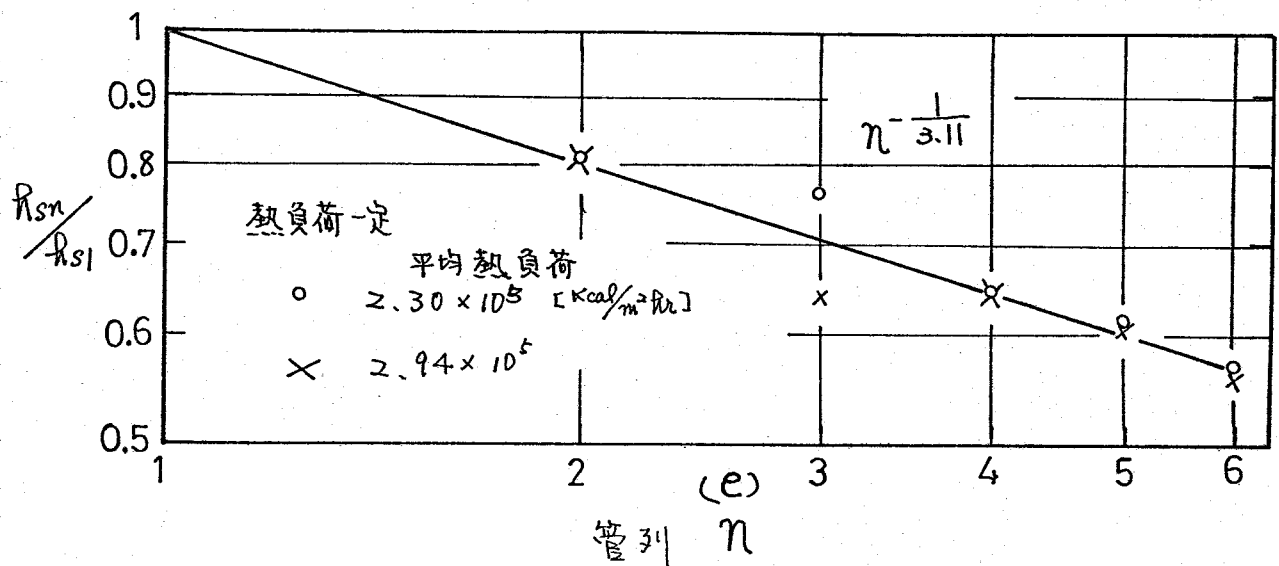


図5.9 1管列に対する n 列目の熱伝達率比の変化 (熱負荷一定)

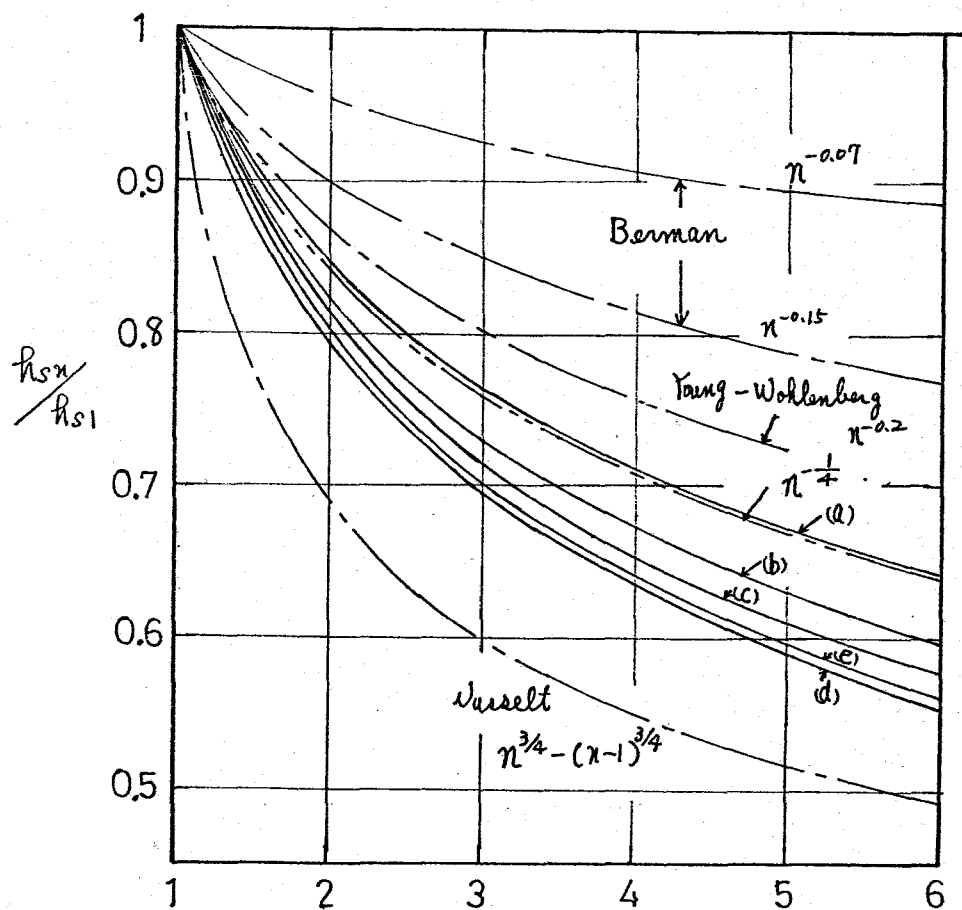
熱負荷は 2.30×10^5 , 2.94×10^5 [kcal/m²h] の2通りであり、熱負荷が一定の場合下部管列ほど冷却水流速を増加させなければならず、各管列の凝縮量は管内冷却水流速一定のときより増加する。したがって下部管列の

凝縮液の影響は大きくはるゝとが考えられる。実験によれば熱負荷一定のときの(5.10)式の指数 n は、パイプ列の冷却水流速が同一のときの流速一定のときの指数 $1/4.06$ よりも大きく、ほぼ $1/3.11$ となり、熱負荷一定のときの方がその影響が大きいのがわかる。ただ実験点数が少ないので、熱負荷の影響についてはさらに実験検討する必要があると思われる。

図5.10は、図5.8、図5.9をBerman、Young - Wöhlenberg [5] の実験結果、およびNusseltの理論解(5.9)式を対比して示したものである。本実験結果はNusseltの理論解よりもパイプ列による影響が小さいことがわかり、このことは先に述べた液膜の観察結果、及び写真a、bのように凝縮液はNusseltモデルのように連続的に流下せず、液滴となって滴下し、液膜は常に波打ち現象がみられるので、上述したように凝縮量が増加するにもかかわらず熱伝達率は高くはるゝものと思われる。

以上のことより、パイプ列においては、パイプ列の管内冷却水流速を一定とすると、管壁温度は常に下部パイプ列にはるゝに従い低下し、その低下割合は負荷により異なるが、管壁温度を等温としたNusselt理論より、

凝縮量は増加するが、凝膜の波打ち現象等により、凝縮液の影響は Nusselt 理論 (5.9) 式よりも小さく (5.10) 式の指数 m はほぼ $1/4 \sim 1/3$ の範囲にあることがわかった。又各管列の熱負荷が一定の場合には最上部管列が同じ流速の冷却水流速一定実験の値に比べ、(5.10) 式の指数の絶対値は大きくなる。



- (a) 流速 1%
 (b) 2%
 (c) 2.5%
 (d) 3.0%
 (e) 熱負荷一定

管列 n

図 5.10 熱伝達率比

5.4 熱通過率

$\alpha = \beta = \gamma$ の熱通過率 k は 5.3 節の 蒸気側 熱伝達率 h_s , 管の熱抵抗, 冷却水側の熱伝達率 h_w から計算によって求めることができるが, 実験では実際にした, 蒸気温度 T_s , 冷却水入口, 出口温度 t_1, t_2 および冷却水流量 G と冷却水出入口温度差から求めた交換熱量 Q を用いて式で求めることができる。

単管については

$$k = \frac{Q}{\pi d_2 L} \frac{\ln(T_s - t_1) / (T_s - t_2)}{t_2 - t_1}$$

$$= \frac{Gc}{\pi d_2 L} \ln \frac{T_s - t_1}{T_s - t_2} \quad (5.11)$$

また 6 管列の平均熱通過率 k_m は, 各管の交換熱量の合計 $\sum Q$ と次のような各管の流量と冷却水出口温度から求めた平均出口温度 t_{2m} を用いて算出できる。

$$t_{2m} = \frac{\sum Gc t_2}{\sum Gc}$$

$$\therefore k_m = \frac{\sum Q}{6 \pi d_2 L} \ln \frac{(T_s - t_1) / (T_s - t_{2m})}{t_{2m} - t_1} \quad (5.12)$$

従来、復水器の熱通過率については、Heat Exchanger Institute 基準による次の実驗式^{〔22〕}がよく用いられている。

$$K = A_K \sqrt{U} \varphi_t \varphi_M \quad (5.13)$$

ここで係数 A_K は 外径 $5/8"$, $3/4"$ に対して 2400
 外径 $7/8"$, $1"$ に対して 2330

また φ_t , φ_M は 冷却水入口温度 及び 管材質
 に対する修正係数で

入口温度	10°C	15°C	21.1°C	25°C
φ_t :	0.84	0.92	1	1.035

φ_M : 管材の種類、厚さによって異なるが
 実験に用いたアルミ管では 1.00
 とされる。

土居田、米本^{〔23〕}によれば、コンデンスの熱通過率
 は冷却水温度 $0^\circ \sim 30^\circ \text{C}$ のとき、管外径の
 -0.13 乗に比例すると述べている。本実験の
 試験冷却管の外径は $d_2 = 0.012 \text{ [m]}$ であって
 (5.13) 式の外径範囲に入らないので、上記の
 考えを適用すると係数 A_K は 2550 となり、
 実験中の冷却水入口温度は約 $10.5 \sim 12.7^\circ \text{C}$ で
 あるので修正係数 φ_t を 0.85 φ_M を 1 とすると

(5.13)式は

$$K = 2550 \times 0.85 \sqrt{U} \quad (5.14)$$

とある。

実験による計算結果を図5.11、図5.12に示す。
 図5.11は横軸に冷却水流速 U を、縦軸に
 熱通過率 K をとり、各管列の熱通過率の流
 速による変化を示したもので下部管列ほど上部管
 列からの蒸気の影響が強く表われ冷却水流
 速が同一でも熱通過率が低下しているのが見られ
 る。

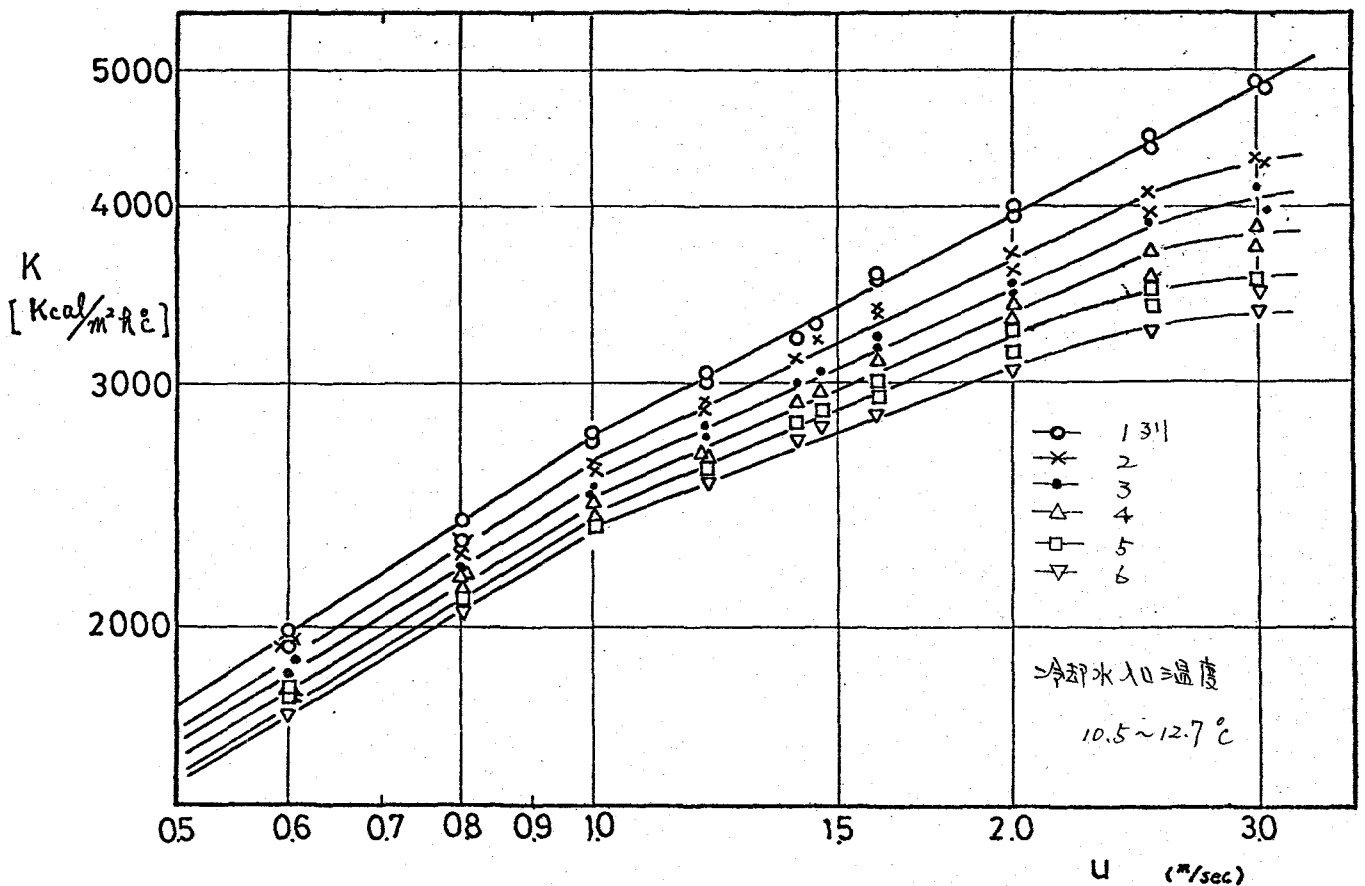


図5.11 水平管列における熱通過率変化

図中 u が 1 m/s 以下, Re が 9000 以下では冷却水側の熱伝達率が低く熱通過率に支配的である上に管内の流れ状況は遷移域であって乱流域の $Nu \propto Re^{0.8}$ に対し $Nu \propto Re$ であるので流速の影響がそれ以上の領域よりも強く表われているのかわかる。また 2.5 m/s 以上で見られる2割目以下の曲線傾向は蒸気側の熱伝達率が上部からの液滴によって低下して来た結果を示している。

図 5.12 は $\phi 1$ 管列および $\phi 1$ 管列から $\phi 6$ 管列までの平均熱通過率 K_m の流速 u による変化を示したものである。

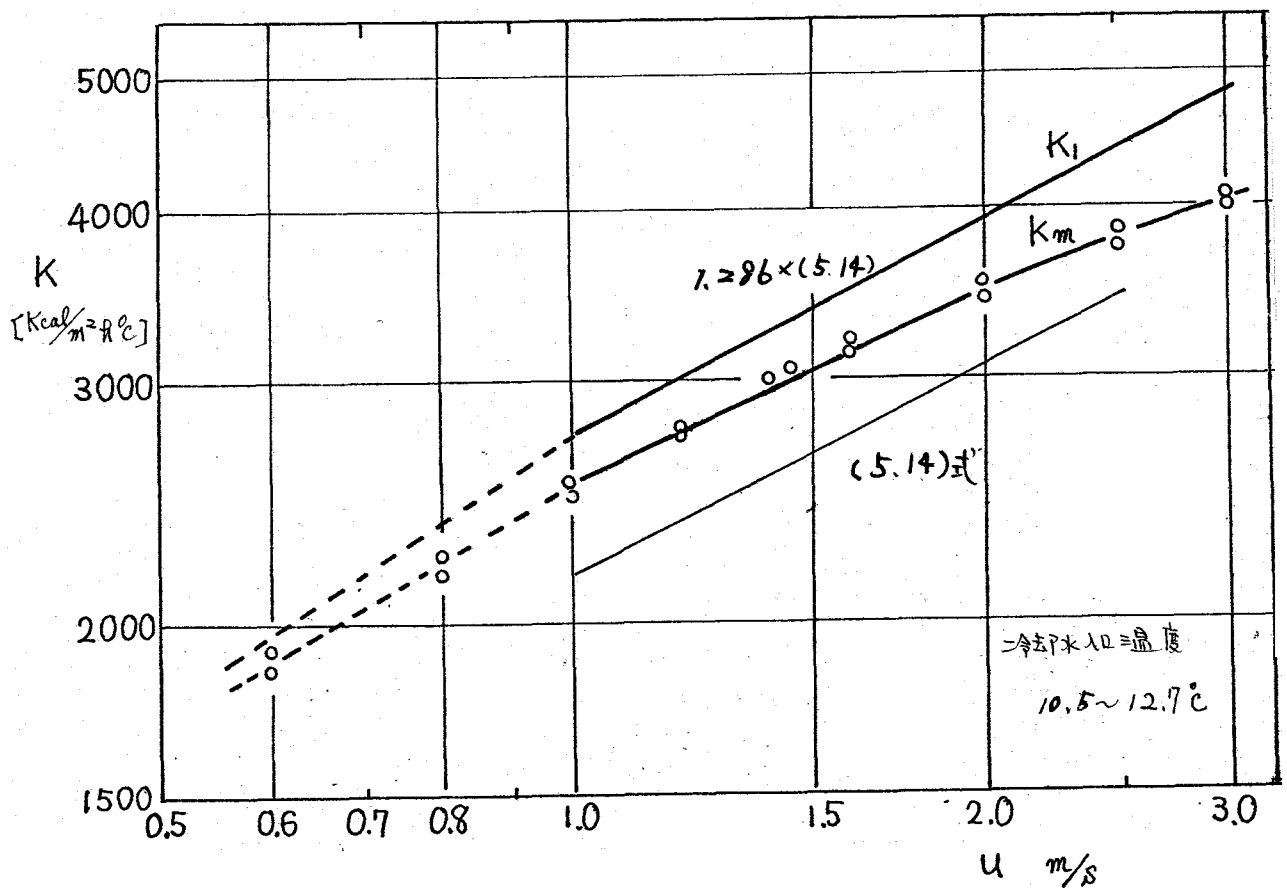


図 5.12. $\phi 1$ 管列と平均の熱通過率変化

図中細線は (5.14) 式の HEI 値である。K₁ は (5.14) 式より 約 28.6% ほど高くあらわれ u の 0.5 乗に比例し (5.14) 式の傾向と一致している。

しかし K_m は 1 ~ 2.5 m/s 流速の域では u の 0.45 乗にほぼ比例し その絶対値は (5.14) 式より高いが、速度の増加につれ その差が小さくなっていく。前述のように u の大きいところでの K の低下は上部≒液≒滴の影響による蒸気側熱伝達率がその原因と考えられるから、管列が増加する程、平均熱通過率 K_m に対する冷却水≒流速 u の影響は小さくなり、この影響は下部≒液が増加して液膜の≒流れが乱れを形成するまで続くと考えられ、 K_m に対する u の指数は HEI 式より低く見積る必要があるように思われる。

5.5 傾斜管の熱伝達

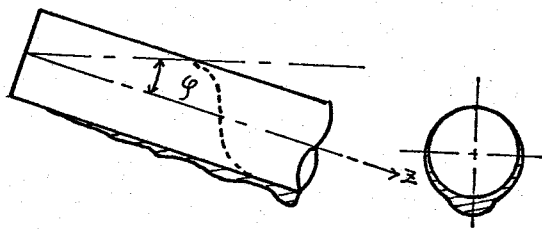
水平管列においては前述のように上部の凝縮が下部管列に落下してその凝膜の厚さを増加させ、下部管列の熱伝達率の低下をまねく。したがって、いま管列全体を長さ方向に傾斜させ、凝縮によって生成される凝縮を下部管列に落下させることなしに、常に管の長さに沿って流下せれば凝縮の影響は防止でき下部管列の熱伝達率の増加が得られると推定される。(しかし水平管および垂直管の管外表面凝縮における Nusselt 解に示されている様に両者の熱伝達率の比は、管径を d_2 、管長を L とすれば

$$h_{hor} / h_{vert} = 0.77 \sqrt[4]{\frac{L}{d_2}}$$

であり、 L/d_2 が 2.84 までは垂直管の方が水平管より熱伝達率は大きい。しかし L/d_2 がそれ以上になると水平管の方が熱伝達率は大きくなり、本実験装置のように $L/d_2 = 25.25$ では垂直管の熱伝達率は水平管の熱伝達率の 57.9% に過ぎなくなるとなる。また単一管の傾斜による凝縮熱伝達率の変化については

Hassan - Jakob^[25] が Nusselt と同様の仮定を用いて理論解を求めており、Silin^[15] が

Garrett - Wightton^[24] によって実験的に確かめられている。 Hassan - Jakob によれば傾斜管円周上に生成した凝膜は、図5.13のように、円管



表面の接平面と、その接平面に直交する鉛直平面の交線に沿って流れ、上部立端から次の助走区間

図5.13 傾斜管上

$$L = 3.2 r_2 \tan \varphi$$

の凝宿状況

を経るとほとんど一定の形に落ち着く。その凝宿膜の形は水平円管と同じ様な形になると考えている。

したがっていま h_m を円管表面上の微小リ=グに対する平均熱伝達率とすると、管の長さ全体に対する平均熱伝達率 h_{sl} は、

$$h_{sl} = \frac{1}{X_L} \int_0^{X_L} h_m(x) dx \quad (5.15)$$

ここで X_L は換算長さで、 $X_L = L / r_2 \tan \varphi$ となり、これを数値計算して h_{sl} を求めている。

これによれば $X_L = 50$ のときの平均熱伝達率は無限長の時に比べてその誤差は2%以内であり、本実験用冷却管では φ が 20° でも X_L は138.7となり無限長の管としてあつかうことができる。

この場合平均熱伝達率 h_{sl} は

$$h_{sl} = 0.725 \sqrt[4]{\frac{\gamma^2 \lambda k^3 \cos \varphi}{\mu d_2 (T_s - T_{w2})}} = h_{Rn} (\cos \varphi)^{1/4} \quad (5.16)$$

となり、水平管を傾斜させると (5.16) 式からわかるように $\cos \varphi$ の 0.25 乗に比例して熱伝達率は減少することを示している。Selin は 3 種のアルコールについて、Garrett - Wighton は水蒸気に対し、上記理論式 (5.16) と比較実験を行っている。両者とも (5.16) 式に対し水平で幾分低く、垂直で幾分高いが、傾向的にはよく一致している。これらの結果から一般に単一管では熱伝達率は水平が一番大きく、傾斜させるにしたがい減少して来る傾向にあるので、管列の管の長さ方向の傾斜によって平均熱伝達率の増加を得ようとするには、下部管列への滴下液の影響が小さく、しかも傾斜による各管の熱伝達率の低下が大きくない適当な傾斜角を選ばなければならぬ。

図 5.14 は冷却水流速一定のもとで管列を長さ方向に傾斜させたときの傾斜角度によって全交換熱量 Q がどのように変化をするのかを求めたもので、熱量は傾斜の始めに急増し、冷却水流速 1 m/s で約 30° 、 2 m/s で約 50° 、 3 m/s で約 60° あたりでほぼ一定となり、以後多少減少気味であるが、水平管列に対して交換熱量は 1 m/s で約 6.7% 、 2 m/s で 10.1% 、 3 m/s で 15.1% 増加している。

このことから、このような管列のコエフェンシエンスでは上部

管列の凝縮液が滴下しなくなり，下部管列へ影響を与えなくなるまで交換熱量は最大となる傾向をもち，その効果は熱負荷の大きいところほど大きい

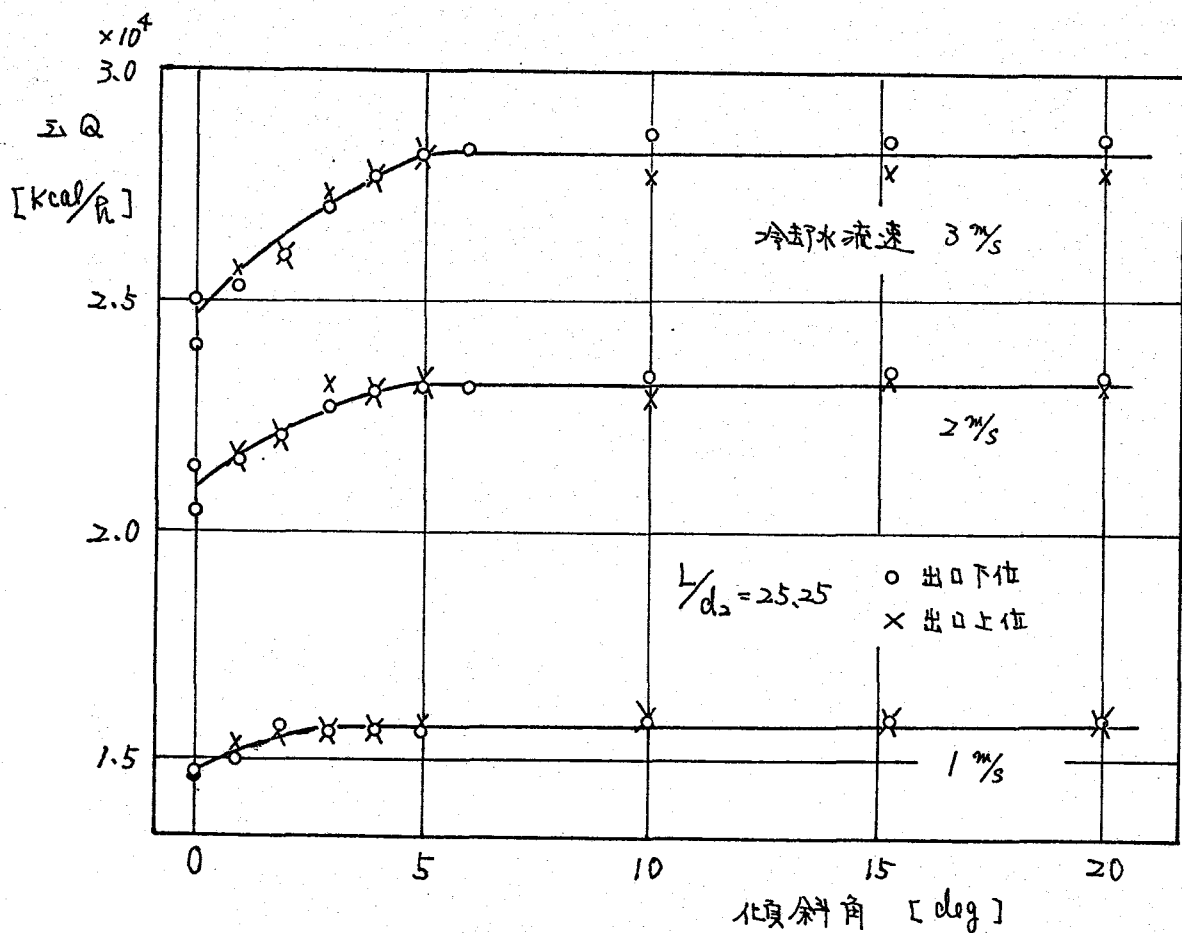


図 5.14 傾斜による交換熱量の変化

図 5.15 (a)(b) は 傾斜角 と 熱通過率 K の関係を示したものであり，(a)(b) とも 1 管列の K は角度の増加によってほとんど変らず，わずかに低下の傾向を示すが，2 列目以下は液滴の滴

下いはい所まで急激に増加し、以後ほとんど等しい値に近く一定になる。

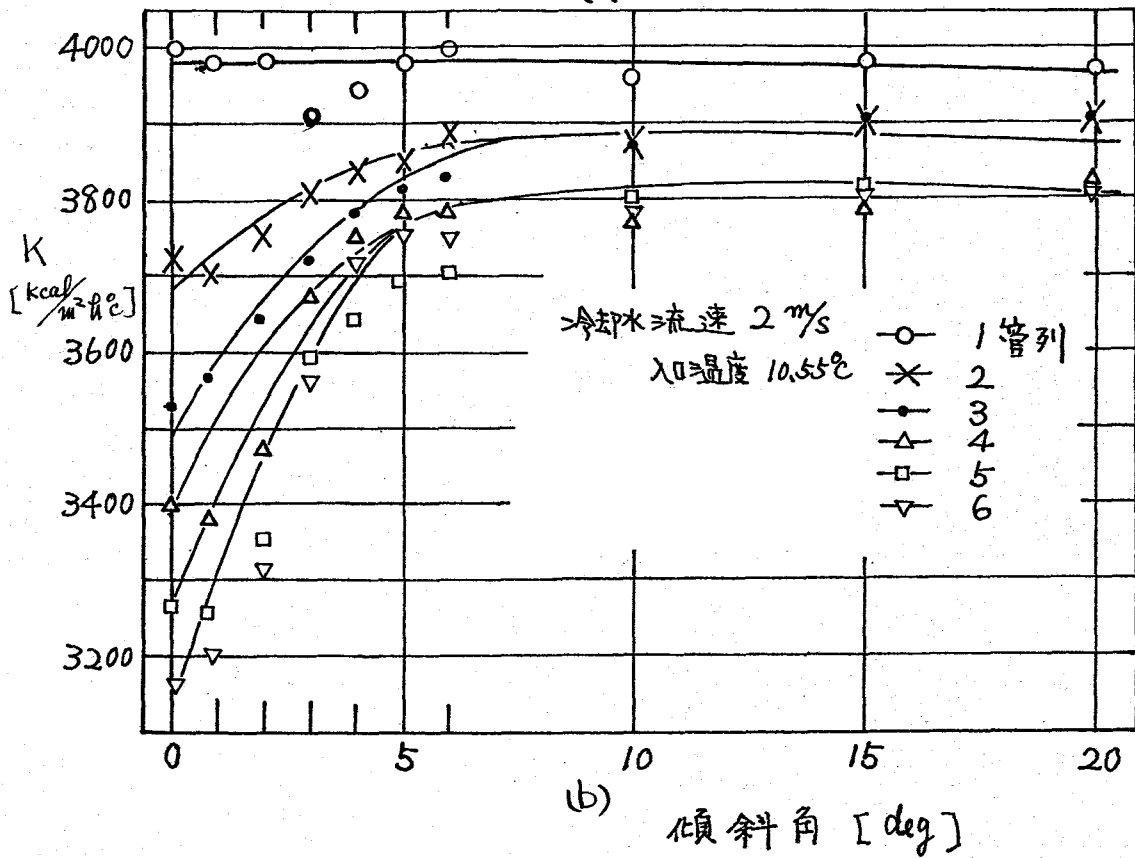
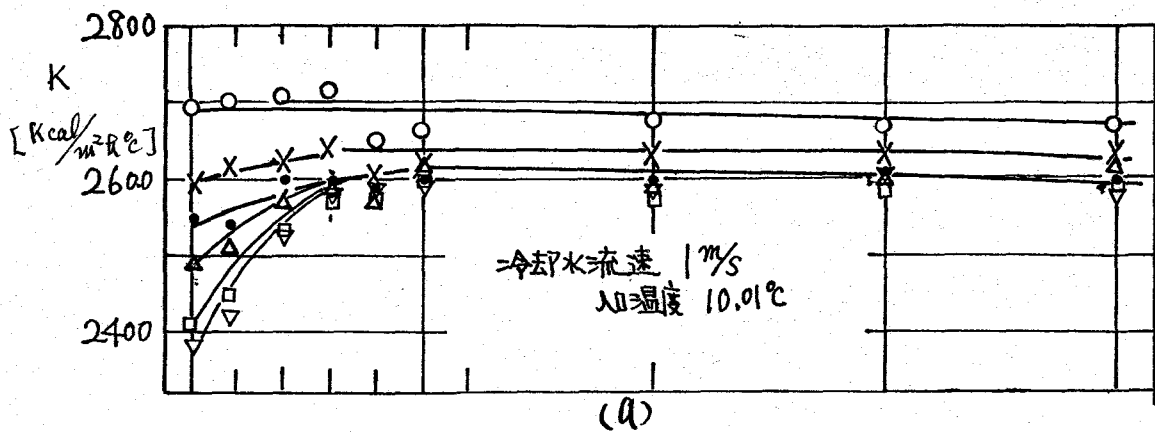


図 5.15 傾斜による熱通過率の変化

観察によれば、わずかに傾斜させても、各管列の凝縮液は滴下し、かつ管の長さ方向に流下を始め、角度の増大につれて滴下は減少し、6管列とも管底部に沿って図5.13のように波打ちながら、流下して行き、ある角度以上になると、全管列とも滴下がなくなり、全凝縮液は管長さ方向に流下しているのがみられた。

以上のとおり、管群の管配列について、垂直配列をもつ復水器等については、管の長さ方向へ傾斜させる事によって交換熱量の増加をはかる事ができる。その効果の高い傾斜角度は熱負荷によって異なるが、高熱負荷平均 3.6×10^5 [Kcal/m²h] 程度では約 6° 、低熱負荷平均 2.16×10^5 [Kcal/m²h] 程度では約 3° ほどとなる。

6. 結 論

垂直に6管列配置した実験用コデニサを用いて膜状凝縮熱伝達実験を行なった結果以下の結論を得た。

(1) 従来凝縮熱伝達実験に用いられていた管壁温度測定法は工作上困難な上に平均温度の測定としてはかなり誤差を含んでいたが、本実験で用いた電気抵抗測定法による温度測定では満足できる結果が得られた。

(2) 単管に相当する管列の最上列の管の蒸気側の熱伝達率は *Nusselt* 理論の約20%増になり、低熱負荷では *Nusselt* 理論に近づき、高熱負荷では多少ははれる傾向を持つ。

(3) 冷却水側の熱伝達率は実験値そのままでは *Dittus - Boelter* 式より約10%大きいが、*Provan* の求めた温度助走区間による補正式を用いるとその値は *Dittus - Boelter* 式の約7%増となる。さらに *Provan* による粘性変化による補正を行えば実験値は

Dittus - Boelter 式 3~4 % 増しにすぎず" = れ
らの補正を用いれば" Dittus - Boelter 式は充分
使用できる。しかし流体と壁との温度差が
大きく、熱負荷が一定とみなせるときは Allen
- Eckert の式で算出した方がよいと思われ
る。

(4) 各管列の冷却水流速を一定にしたときの
垂直管列の凝縮熱伝達実験結果では
上部管列の下部管列への凝縮液の
影響は Nusselt の理論より少なく、管列
 n に対する指数関数で表わされ、 n の
指数はほぼ $-1/4 \sim -1/3$ である。

(5) 熱通過率は従来 HEI では冷却水
流速 u の 0.5 乗に比例しておりこの値が
設計上広く用いられている。実験では 1
管列で u の 0.5 乗に比例するが、2 列目以
下では蒸気側熱伝達率が低下するため
この指数は小さくなって来る。実験に用い
た 6 管列の平均熱通過率は u の 0.45 乗
に比例する。

(6) 管群を長さ方向に傾斜させた場合、
冷却水流速 1 m/s のとき約 3° 、 2 m/s のとき

約 5° , 3 m/s のとき約 6° で落下液滴がなくなり、凝縮液は管の長さ方向に流下するようになる。交換熱量はこの角度まで急激に増加し、この角度からはほとんど一定でむしろ下る傾向になる。この交換熱量の増加割合は冷却水流量は冷却水流速 1 m/s で 6.7% , 2 m/s で 10.1% , 3 m/s で約 15.1% であった。

おわりに、本実験の解析 および 論文作製にあたり 多くの御指導を頂きました本学の堀田秀夫教授、五島正雄講師に深く感謝します。また実験装置製作および実験施行にあたり本研究室の佐々木義明技官、学生の石原靖彦、鹿野慎一、三浦明、道山孝宣の各氏の御協力に御礼を申し上げます。

参考文献

[1] W. Nusselt, VDI 2, 60-28 (1916) 569,
quoted by Jakob P 661 (Heat
Transfer Vol 1)

[2] McAdams, W.H and Frost, T.H., Ind. Eng.
chem. 14, 1 (1922), 13~18

藤井, 上原, 佐野川, 世古口: 伝熱工学の進
展 1, P 63

[3] 藤井, 上原, 佐野川, 世古口: 伝熱工学の進展 1
巻 賢堂 P 61~62

[4] Berman, L.D.: Israel Program of Scientific
Translation, Jerusalem (1969), 1~40

藤井, 上原, 佐野川, 世古口: 伝熱工学の進展 1,
P. 76

[5] F.L. Young and W.J. Wohlenberg; Trans. ASME,
64, (1942), 787~794

藤井, 上原, 佐野川, 世古口: 伝熱工学の進
展 1, P 76

[6] Ginabat, A., 冷面 = 凝汽器の改良, 特許
41106 (1921)

藤井, 上原, 佐野川, 世古田; 伝熱工学の進
展 1, P73

[7] F.W. Dittus and L. M. K. Bvelter;
Univ. of California Publication in
Engng Vol 2 (1930) 443, quoted
by McAdams P219

[8] R.W. Allen and E.R.G. Eckert:
J. Heat Transfer 1964, 86 (3)
P. 301 ~ 310

[9] ラッコ 機械工学便覧 改訂第4版
日本機械学会 P11-26

[10] E.J. LeFevre - J.W. Rose; Int. J. Heat
Mass Transfer Vol 8, 1965, P1117

[11] E.E. Wilson; Trans. ASME, Vol 3, 7, 47
(1915) quoted by McAdams
(Heat Transmission 3rd Ed. 1954)

[12] H. Hampson ; Proceeding , 1961~62 , Int. Heat
Trans. Conf. 37 P 310

[13] 藤井, 上原, 蔵田 : 日本機械学会論文集
37巻 294号 (昭和46-2)
P 364 ~ 372

[14] E. M. Baker and U. Tsao ; Industrial and
Engng Chemistry Vol 32, NO. 8, 1940
P 1115

[15] G. Selin ; Proceedings of the 1961~62
Int. Heat Transfer conf. P 279

[16] Doeblin "Measurement Systems, Application and
Design" . McGraw-Hill, Kogakusha P 532

[17] 藤井, 上原, 佐野川, 世古田 : 伝熱工学の進
展 1, P. 66

[18] Bosh 「工業伝熱論」 高橋安人訳 10社
P 243

[19] 山中直次郎 : 日本機械学論文集 7.28 (1941)

II-16 ~ 25.

藤井, 上原, 佐野川, 世古口 : 伝熱工学の進展1

P. 74

[20] 藤井, 上原, 平田, 小田 : 日本機械学会論文集

37巻 294号 (昭46-2) P373~382

[21] T. F. Provan : NEL Report No. 219, 3, 1966

[22] Heat Exchanger Institute : Standards

for Steam Surface Condensers (1955)

伝熱工学資料 日本機械学会 P157

[23] 堀田, 米本, 佐々木 : 東京商船大学研究報告

(自然科学) 第20号 (昭和44, 10)

P35~49

[24] T. W. Garrett and J. L. Wightton : Int. J.

Heat Mass Transfer, Vol 7, 1964

P 1235 ~ 1243

[25] K. E. Hassan and M. Jakob : Trans of ASME

Vol 80 (1958) 887

单管

ΔP mm Hg	大气压 mm Hg	T_s °C	t_1 °C	t_2 °C	u m/s	Q kcal/h	R_0 m Ω	R m Ω	T_{mo} °C	ϕ	T_m °C	T_{wz} °C	R_s kcal/m ² ·h·°C
44	769.5	102.73	18.67	32.35	0.4367	1688.9	0.27489	0.37475	85.076	0.9190	92.575	93.006	15205.2
"	"	"	18.78	30.40	0.6058	1990.2	"	0.37190	82.648	0.9161	90.217	90.726	14514.2
"	768.0	"	19.12	29.33	0.8135	2348.2	"	0.36793	79.266	0.9139	86.734	87.334	13352.1
"	"	102.65	19.28	28.65	1.0134	2684.6	"	0.36506	76.821	0.9122	84.215	84.901	13241.5
"	"	102.18	19.38	28.08	1.2068	2968.4	"	0.36256	74.691	0.9111	81.979	82.738	13365.9
"	755.0	101.96	19.70	27.74	1.3995	3181.3	"	0.36110	71.326	0.9109	78.303	79.116	12191.5
"	"	102.02	19.80	27.33	1.5988	3403.9	"	0.35840	69.042	0.9105	75.829	76.699	11768.3
"	754.2	102.14	20.30	27.03	1.9840	3775.2	"	0.35475	65.954	0.9105	72.437	73.402	11500.3
"	"	102.16	20.45	26.68	2.3694	4173.6	"	0.35235	63.923	0.9101	70.237	71.304	11841.2
"	754.0	102.00	20.70	26.60	2.5755	4296.4	"	0.35180	63.458	0.9107	69.680	70.779	12046.9
"	"	102.33	20.82	26.28	2.9476	4550.4	"	0.34900	61.089	0.9110	67.057	68.220	11678.7
"	767.2	102.65	17.80	28.68	0.4015	1235.1	0.27606	0.38060	88.681	0.9233	96.048	96.364	17199.7
"	"	102.78	17.88	28.24	0.6032	1766.9	"	0.37500	83.922	0.9173	91.488	91.940	14268.9
"	"	102.83	17.98	27.12	0.8073	2086.3	"	0.37090	80.452	0.9154	87.887	88.420	12684.0
"	"	102.86	18.08	26.33	1.0123	2361.3	"	0.36817	78.136	0.9133	85.553	86.157	12376.1
"	767.5	102.86	18.26	25.75	1.2071	2556.3	"	0.36590	76.211	0.9135	83.427	84.081	11916.8
"	767.7	"	18.38	25.23	1.4119	2734.5	"	0.36400	74.599	0.9129	81.717	82.415	11709.1
"	761.0	103.04	18.34	30.25	0.3994	1345.0	0.27653	0.38037	87.938	0.9224	95.336	95.680	15997.2
"	"	102.70	18.58	29.18	0.5857	1755.4	"	0.37525	83.602	0.9180	91.070	91.518	13743.5
"	"	103.12	18.45	28.28	0.7017	1950.3	"	0.37322	81.883	0.9164	89.353	89.861	12867.7
"	"	103.02	18.43	27.72	0.8076	2121.3	"	0.37098	79.986	0.9151	87.407	87.949	12322.1
"	"	102.80	18.34	26.80	1.0134	2424.0	"	0.36705	76.658	0.9136	83.908	84.527	11613.2

表 1 单管

n	R_0 m_{12}
1	0.27696
2	0.27668
3	0.27611
4	0.27649
5	0.27445
6	0.27535

(A)

n	R_0
1	0.27710
2	0.27710
3	0.27639
4	0.27615
5	0.27365
6	0.27535

(B)

n	R_0
1	0.27678
2	0.27654
3	0.27603
4	0.27716
5	0.27381
6	0.27584

(C)

n	R_0
1	0.27511
2	0.27596
3	0.27600
4	0.27601
5	0.27336
6	0.27527

(D)

n	R_0
1	0.27705
2	0.27615
3	0.27715
4	0.27653
5	0.27363
6	0.27544

(E)

n	R_0
1	0.27713
2	0.27636
3	0.27694
4	0.27657
5	0.27353
6	0.27556

(F)

n	R_0
1	0.27680
2	0.27606
3	0.27647
4	0.27655
5	0.27338
6	0.27557

(G)

n	R_0
1	0.27720
2	0.27587
3	0.27719
4	0.27660
5	0.27352
6	0.27564

(H)

n	R_0
1	0.27724
2	0.27641
3	0.27911
4	0.27648
5	0.27357
6	0.27564

(I)

n	R_0
1	0.27575
2	0.27627
3	0.27670
4	0.27676
5	0.27355
6	0.27570

(J)

n	R_0
1	0.27619
2	0.27619
3	0.27919
4	0.27632
5	0.27347
6	0.27543

(K)

表. 2. 基準 R_0

水平管

T_s °C	t_1 °C	ΔP mmHg	大气压 mmHg	Vent量 g/min	Cond量 g/min
102.86	12.69	56	768.8	210	247.5

n	t_2 °C	U m/s	Q kcal/h	K kcal/m ² h°C	R_0 m Ω	R m Ω	T_{m0} °C	ϕ	T_m °C	T_{w1} °C	T_{w2} °C	R_{wv} kcal/m ² h°C	R_s kcal/m ² h°C
1	23.78	0.3850	1207.2	1250.6	A	0.38193	88.757	0.9187	96.612	96.263	96.920	1628.1	17791.9
2	25.54	0.4040	1467.9	1537.5		0.37838	86.084	0.9162	93.958	93.534	94.333	2077.3	15070.0
3	24.85	0.3985	1370.1	1428.8		0.37629	84.970	0.9171	92.651	92.255	93.001	1963.2	12165.8
4	24.78	0.4000	1367.3	1425.3		0.37615	84.414	"	92.044	91.650	92.394	1974.5	11436.9
5	23.37	0.4015	1212.4	1252.8		0.37545	86.179	0.9185	92.826	93.476	94.136	1691.0	12165.8
6	23.12	0.4037	1190.4	1228.3		0.37582	85.448	0.9187	93.010	92.666	93.314	1675.4	10916.8

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond.量
102.90	12.64	56	768.8	207.5	246

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{wv}	R_s
1	23.88	0.6004	1907.9	1976.3	A	0.37425	82.263	0.9110	90.300	89.749	90.787	2809.4	13789.2
2	23.80	0.5966	1883.5	1950.1		0.37223	80.878	0.9112	88.760	88.216	89.241	2832.8	12072.0
3	23.24	0.5980	1792.1	1849.0		0.37047	80.033	0.9118	87.775	87.258	88.233	2741.3	10696.4
4	23.15	0.5966	1773.0	1828.3		0.36918	78.510	0.9119	86.095	85.583	86.548	2757.3	9492.2
5	23.05	0.5985	1761.6	1815.4		0.36645	78.499	0.9120	86.073	85.565	86.524	2738.1	9417.1
6	22.83	0.5999	1714.0	1764.0		0.36663	77.631	0.9124	85.084	84.590	85.522	2698.5	8634.6

表 3.1 水平管 冷却水流速一定

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
102.98	12.46	56	768.8	216	413.5

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	22.76	0.7962	2318.7	2380.7	A	0.37045	79.050	0.9073	87.127	86.458	87.719	3544.7	13301.3
2	22.49	0.7969	2259.9	2316.5		0.36745	76.832	0.9077	84.645	83.993	85.222	3575.9	11141.1
3	22.05	0.7998	2168.6	2217.0		0.36442	74.902	0.9082	82.473	81.847	83.027	3533.5	9514.9
4	21.95	0.7993	2144.7	2191.2		0.36372	73.886	0.9083	81.345	80.727	81.893	3553.6	8904.1
5	21.73	0.7984	2092.6	2135.1		0.36066	73.559	0.9087	80.950	80.346	81.485	3481.8	8522.5
6	21.63	0.8005	2075.5	2116.4		0.36090	72.758	0.9088	80.059	79.461	80.590	3499.6	8115.1

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
102.98	12.26	56	768.8	221.5	468.3

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	21.80	0.9948	2683.3	2735.9	A	0.36615	75.414	0.9046	83.367	82.593	84.053	4307.1	12411.2
2	21.46	0.9960	2590.8	2636.2		0.36315	73.193	0.9054	80.867	80.120	81.529	4310.0	10573.6
3	21.10	0.9955	2489.2	2526.3		0.36060	71.662	0.9056	79.132	78.414	79.768	4241.4	9384.2
4	20.98	0.9954	2454.2	2489.9		0.35960	70.396	0.9058	77.717	77.009	78.344	4276.8	8721.1
5	20.73	0.9926	2377.1	2408.1		0.35620	69.453	0.9063	76.965	76.279	77.572	4184.1	8190.4
6	20.66	0.9929	2358.2	2387.9		0.35613	68.701	0.9064	75.795	75.115	76.398	4230.9	7766.4

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
102.84	12.69	56	766.2	232	248.5

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	25.63	0.3951	1445.6	1515.4	B	0.37940	86.463	0.9165	94.340	93.923	94.710	2036.4	15566.0
2	24.54	0.3932	1317.3	1371.4		0.37875	85.914	0.9176	93.629	93.249	93.966	1858.1	12995.0
3	24.49	0.3924	1309.2	1362.7		0.37722	85.438	0.9177	93.100	92.722	93.435	1859.2	12186.0
4	23.80	0.3930	1234.5	1279.4		0.37805	86.415	0.9183	94.103	93.747	94.419	1720.8	12833.4
5	23.17	0.3974	1177.4	1215.4		0.37699	88.441	0.9189	96.247	95.907	96.548	1588.6	16380.5
6	23.34	0.3982	1199.1	1239.2		0.37545	85.139	0.9186	92.683	92.337	92.990	1697.8	10657.1

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.06	12.59	56	766.2	226	346

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	23.80	0.5949	1885.6	1947.9	B	0.37455	82.364	0.9112	90.391	89.847	90.873	2770.3	13544.6
2	23.56	0.5984	1856.0	1914.6		0.37310	81.139	0.9113	89.037	88.501	89.511	2774.2	11992.0
3	23.22	0.5947	1787.5	1840.1		0.37027	79.549	0.9118	87.244	86.728	87.701	2733.9	10188.3
4	23.12	0.5966	1771.0	1822.0		0.36945	79.122	0.9119	86.766	86.255	87.219	2725.4	9787.1
5	23.10	0.5949	1767.7	1818.3		0.36661	79.558	"	87.244	86.734	87.696	2700.9	10072.3
6	22.88	"	1730.9	1778.1		0.36706	78.003	0.9122	85.511	85.011	85.953	2708.1	8857.9

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
102.98	12.56	56	766.2	231	414.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	22.61	0.8002	2273.9	2333.8	B	0.3700	78.519	0.9077	86.503	85.847	87.084	3505.8	12523.4
2	22.37	0.7956	2206.8	2261.7		0.36805	76.871	0.9081	84.650	84.014	85.214	3490.0	10874.5
3	22.05	0.8010	2149.4	2198.5		0.36515	75.211	0.9084	82.795	82.175	83.344	3487.1	9582.9
4	21.85	0.7993	2099.6	2144.9		0.36395	74.458	0.9087	81.939	81.333	82.476	3445.5	8964.3
5	21.66	0.7997	2057.6	2099.7		0.36073	74.526	0.9089	81.996	81.402	82.522	3367.7	8804.8
6	21.63	0.7940	2036.2	2077.5		0.36094	72.798	0.9092	80.068	79.481	80.589	3434.9	7961.0

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
102.63	12.46		766.2	267.5	467.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	21.80	0.9938	2624.4	2689.8	B	0.36565	74.842	0.9051	82.689	81.932	83.360	4261.9	11922.7
2	21.51	0.9950	2546.0	2604.9		0.36370	73.194	0.9055	80.833	80.098	81.483	4245.1	10540.0
3	21.20	0.9887	2443.2	2495.1		0.36050	71.271	0.9061	78.657	77.952	79.281	4206.4	9160.6
4	21.02	0.9981	2415.6	2464.1		0.35974	70.887	0.9063	78.216	77.519	78.833	4182.2	8886.5
5	20.76	0.9947	2334.2	2377.4		0.35595	70.435	0.9068	77.674	77.001	78.271	4066.9	8388.8
6	20.70	0.9919	2313.7	2355.8		0.35606	68.647	0.9069	75.694	75.026	76.285	4165.6	7688.5

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.26	12.36	56	760.8	226	473.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	21.56	0.9980	2596.0	2666.9	C	0.36495	74.603	0.9051	82.425	86.676	83.089	4221.2	11854.3
2	21.32	0.9935	2516.8	2581.7		0.36272	72.978	0.9056	80.585	79.859	81.228	4202.6	10476.2
3	21.05	0.9882	2428.0	2486.6		0.36061	71.765	0.9061	79.202	78.501	79.823	4134.4	9473.3
4	20.85	0.9917	2380.6	2435.1		0.35951	69.586	0.9063	76.780	76.093	77.389	4211.2	8379.4
5	20.61	0.9989	2330.0	2379.9		0.35576	70.093	0.9066	77.314	76.642	77.910	4075.3	8376.8
6	20.54	1.0007	2314.4	2362.9		0.35597	68.035	0.9067	75.036	74.368	75.627	4204.9	7607.6

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.28	12.31	56	760.8	216	528.8

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	20.95	1.2002	2931.8	2999.2	C	0.36167	71.828	0.9031	79.535	78.689	80.284	4971.0	11668.7
2	20.66	1.1966	2825.0	2884.9		0.35933	70.107	0.9037	77.578	76.763	78.300	4931.4	10313.1
3	20.24	1.1960	2681.6	2731.5		0.35613	67.964	0.9044	75.148	74.374	75.834	4856.3	8876.7
4	20.05	1.1993	2624.6	2670.4		0.35581	66.460	0.9047	73.461	72.703	74.132	4885.7	8162.7
5	19.82	1.1953	2538.1	2578.8		0.35183	66.732	0.9052	73.721	72.988	74.369	4690.9	7961.0
6	19.77	1.1943	2519.3	2559.0		0.35151	64.248	0.9054	70.961	70.234	71.605	4891.3	7189.8

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.30	12.26	56	760.8	212	575.3

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	20.39	1.4474	3327.1	3390.4	C	0.35915	69.696	0.9012	77.337	76.377	78.187	5829.3	12079.4
2	20.00	1.4429	3157.7	3210.2		0.35572	67.050	0.9019	74.343	73.432	75.150	5797.9	10181.9
3	19.65	1.4432	3015.5	3059.2		0.35270	65.054	0.9026	72.074	71.204	72.845	5742.4	8962.4
4	19.37	1.4559	2926.8	2964.3		0.35168	62.970	0.9031	69.726	68.882	70.475	5802.7	8050.9
5	19.12	1.45085	2814.2	2846.0		0.34750	63.028	0.9037	69.744	68.932	70.464	5560.4	7738.5
6	19.05	1.4450	2774.1	2804.3		0.34695	60.377	0.9040	66.789	65.988	67.498	5798.8	6978.2

83

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.52	12.36	56	760.8	223.5	606

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	20.07	1.5923	3471.1	3523.3	C	0.35705	67.919	0.9007	75.407	74.405	76.294	6275.7	11586.8
2	19.65	1.5945	3286.5	3327.6		0.35300	64.747	0.9015	71.821	70.873	72.661	6301.8	9635.8
3	19.32	1.5947	3138.2	3171.2		0.35040	63.103	0.9023	69.936	69.030	70.738	6207.0	8644.2
4	19.05	1.5911	3009.6	3036.4		0.34967	61.187	0.9029	67.767	66.899	68.536	6184.7	7752.9
5	18.82	1.5841	2893.4	2915.1		0.34626	61.968	0.9036	68.579	67.744	69.318	5835.6	7629.2
6	18.64	1.6014	2843.5	2861.8		0.34430	58.127	0.9039	64.307	63.486	65.034	6234.0	6640.6

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.52	12.31	56	760.8	218.5	659.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	19.20	1.9946	3885.6	3922.6	C	0.35240	63.984	0.8992	71.157	70.035	72.150	7530.2	11200.4
2	18.69	1.9944	3597.7	3621.0		0.34804	60.546	0.9005	67.236	66.198	68.155	7464.8	9165.2
3	18.39	1.9955	3430.4	3446.5		0.34580	59.200	0.9013	65.683	64.693	66.560	7312.7	8351.2
4	18.14	1.9992	3295.4	3306.1		0.34444	56.853	0.9020	63.030	62.079	63.872	7398.3	7464.6
5	17.89	1.9967	3150.2	3155.7		0.34016	56.750	0.9028	62.860	61.951	63.665	7072.0	7097.7
6	17.76	1.9970	3077.2	3080.3		0.33917	53.771	0.9032	59.534	58.646	60.320	7422.3	6383.7

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.54	12.24	56	760.8	228.5	721

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	18.42	2.5039	4375.1	4393.8	C	0.34820	60.431	0.8978	67.310	66.048	68.428	9073.5	11228.2
2	17.86	2.4919	3959.6	3963.4		0.34357	56.761	0.8996	63.096	61.953	64.108	8879.3	9019.5
3	17.56	2.4914	3747.4	3744.4		0.34130	55.382	0.9006	61.495	60.413	62.452	8659.6	8183.6
4	17.29	2.4846	3547.6	3539.3		0.33990	53.016	0.9016	58.802	57.778	59.709	8674.4	7251.0
5	17.06	2.4960	3401.6	3389.0		0.33570	52.423	0.9024	58.093	57.111	58.962	8424.9	6833.5
6	16.91	2.4898	3287.5	3272.6		0.33417	49.526	0.9031	54.840	53.891	55.680	8794.5	6141.7

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.93	12.21	56	760.6	240	780

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.84	3.0629	4875.6	4857.3	C	0.34420	57.046	0.8970	63.596	62.190	64.842	10872.7	11206.6
2	17.21	3.0541	4317.6	4285.7		0.33950	53.314	0.8990	59.304	58.058	60.407	10475.3	8888.9
3	16.88	3.0507	4028.1	3990.7		0.33710	51.818	0.9004	57.550	56.388	58.579	10123.7	7951.1
4	16.66	3.0039	3779.5	3739.7		0.33581	49.560	0.9016	54.969	53.878	55.935	10076.9	7040.6
5	16.43	3.0025	3582.5	3540.0		0.33073	48.685	0.9027	53.933	52.899	54.848	9765.1	6522.8
6	16.21	3.0324	3429.5	3384.6		0.33020	46.156	0.9037	51.074	50.085	51.951	10053.1	5889.3

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.78	11.36	56	762.8	235	236

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	24.10	0.3908	1407.7	1451.7	E	0.37960	86.686	0.9158	94.656	94.250	95.016	1937.1	15872.3
2	23.54	0.4040	1291.3	1429.8		0.37769	86.114	0.9157	94.042	93.640	94.397	1922.5	14529.9
3	21.95	0.3985	1193.2	1214.4		0.37883	85.925	0.9174	93.661	93.317	93.986	1637.7	11851.8
4	21.73	0.3988	1169.3	1188.5		0.37845	86.318	0.9176	94.069	93.732	94.368	1593.8	12169.2
5	20.61	0.4083	1067.8	1098.1		0.37697	88.444	0.9186	96.281	95.973	96.554	1404.0	15014.8
6	20.46	0.4091	1052.6	1061.7		0.37745	86.738	0.9188	94.404	94.100	94.673	1415.8	11366.0

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.75	11.21	56	762.8	238.5	360

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	22.54	0.6093	1951.9	1992.7	E	0.37406	82.003	0.9093	90.183	89.619	90.681	2824.5	14158.8
2	22.29	0.6147	1925.7	1963.0		0.37128	80.678	0.9094	88.716	88.160	89.208	2838.6	12448.7
3	22.15	0.6075	1879.1	1913.9		0.37094	79.258	0.9098	87.116	86.574	87.596	2830.2	10855.5
4	22.00	0.6117	1866.2	1898.9		0.36893	78.255	"	86.013	85.475	86.490	2852.5	10047.9
5	21.90	0.6144	1857.0	1888.5		0.36536	78.607	"	86.290	85.754	86.765	2824.8	10170.1
6	21.83	0.6133	1841.6	1871.9		0.36554	76.612	0.9100	84.194	83.662	84.664	2887.5	8914.3

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.40	11.16	56	762.2	235	420

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	21.51	0.8002	2341.7	2384.8	E	0.36954	78.182	0.9059	86.303	85.627	86.902	3556.8	13227.3
2	21.20	0.8001	2271.3	2308.7		0.36682	76.896	0.9062	84.855	84.200	85.436	3514.3	11721.2
3	20.93	0.7980	2196.1	2228.7		0.36585	74.957	0.9066	82.679	82.046	83.241	3501.9	10034.5
4	20.73	0.7965	2155.2	2184.6		0.36366	73.792	0.9069	81.367	80.745	81.918	3500.3	9211.8
5	20.51	0.7944	2100.1	2125.9		0.35948	73.474	0.9072	80.990	80.384	81.527	3423.9	8807.9
6	20.44	0.7960	2088.5	2113.3		0.36096	72.717	"	80.155	79.553	80.689	3447.6	8421.4

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.80	11.16	56	762.2	225	473.5

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	20.73	1.0065	2723.4	2747.8	E	0.36518	74.496	0.9032	82.480	81.694	83.176	4359.1	12149.3
2	20.44	0.9996	2622.7	2641.6		0.36169	72.545	0.9037	80.276	79.519	80.946	4331.7	10506.1
3	20.12	1.0022	2538.9	2552.4		0.36148	71.264	0.9041	78.823	78.091	79.472	4278.2	9527.8
4	19.92	1.0017	2481.0	2491.2		0.35888	69.744	0.9044	77.116	76.400	77.750	4289.9	8690.7
5	19.67	0.9968	2398.3	2404.6		0.35521	69.820	0.9048	77.166	76.474	77.779	4133.0	8391.3
6	19.60	1.0032	2394.0	2399.2		0.35547	68.050	"	75.210	74.519	75.822	4259.8	7768.4

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.56	10.50	56	766.2	228	529

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	19.52	1.1904	3035.9	3038.4	D	0.36185	73.839	0.9006	81.989	81.113	82.765	4832.3	13426.1
2	19.12	1.1945	2911.3	2906.8		0.35790	69.543	0.9011	77.176	76.336	77.920	4979.1	10343.5
3	18.77	1.1940	2791.9	2781.8		0.35640	68.218	0.9016	75.663	74.858	76.377	4877.9	9334.8
4	18.57	1.1843	2702.3	2699.4		0.35486	66.905	0.9021	74.166	73.386	74.856	4831.2	8539.1
5	18.34	1.1887	2635.0	2618.9		0.35051	66.093	0.9024	73.241	72.481	73.915	4774.9	8052.9
6	18.29	1.1931	2627.9	2611.1		0.35107	64.489	"	71.464	70.706	72.135	4910.5	7561.6

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.98	10.45	56	766.2	232.3	570.5

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	18.92	1.3957	3342.4	3316.6	D	0.35895	71.370	0.8990	79.388	78.424	80.242	5517.0	12868.9
2	18.54	1.3790	3154.3	3122.9		0.35515	67.209	0.8997	74.702	73.791	75.508	5597.0	10051.6
3	18.19	1.3855	3032.0	2995.8		0.35250	64.909	0.9002	72.105	71.230	72.880	5605.6	8818.4
4	17.96	1.3866	2944.3	2905.2		0.35119	63.791	0.9064	70.378	69.529	71.131	5599.5	8093.0
5	17.69	1.3887	2842.7	2800.6		0.34696	63.051	0.9011	69.971	69.151	70.698	5429.6	7708.9
6	17.59	1.3913	2808.7	2765.5		0.34712	61.128	0.9012	67.830	67.019	68.547	5575.8	7141.0

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.98	10.93	56	766.2	229	608.8

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	18.92	1.5956	3604.6	3586.2	D	0.35650	69.284	0.8984	77.120	76.080	78.042	6200.8	12653.7
2	18.47	1.5945	3399.3	3373.0		0.35185	64.409	0.8992	71.629	70.648	72.498	6392.5	9762.8
3	18.14	1.5887	3238.7	3207.4		0.35000	62.788	0.8998	69.780	68.845	70.608	6273.9	8758.4
4	17.89	1.5939	3136.6	3101.9		0.34765	60.788	0.9003	67.520	66.615	68.321	6321.3	7922.7
5	17.66	1.5971	3039.0	3001.4		0.34448	60.927	0.9008	67.637	66.760	68.413	6093.5	7696.6
6	17.59	1.5919	2997.6	2959.3		0.34468	59.053	0.9010	65.542	64.677	66.308	6255.2	7155.9

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.78	10.43	56	762.2	224	671

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.61	1.9946	4049.2	3995.9	E	0.35187	63.245	0.8960	70.586	69.418	71.621	7689.5	11376.5
2	17.14	1.9968	3788.3	3728.3		0.34740	60.426	0.8970	67.365	66.271	68.333	7592.7	9627.6
3	16.81	1.9931	3595.3	3531.7		0.34597	58.158	0.8977	64.786	63.748	65.704	7544.8	8489.3
4	16.56	1.9970	3461.2	3395.0		0.34348	56.702	0.8983	63.121	62.123	64.006	7487.3	7814.7
5	16.31	2.0018	3328.0	3259.7		0.33824	55.296	0.8989	61.515	60.555	62.366	7419.1	7209.0
6	16.16	1.9945	3231.3	3162.3		0.33892	53.978	0.8994	60.016	59.083	60.841	7423.4	6745.1

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.70	10.85	56	762.2	231	731

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.29	2.4914	4536.5	4482.8	E	0.34769	59.712	0.8952	66.702	65.393	67.862	9297.9	11399.7
2	16.76	2.5078	4190.5	4128.4		0.34242	56.203	0.8964	62.699	61.489	63.770	9243.9	9423.3
3	16.46	2.4952	3957.8	3892.4		0.34131	54.220	0.8974	60.419	59.277	61.430	9125.1	8395.6
4	16.21	2.4971	3784.3	3716.4		0.33883	52.764	0.8981	58.684	57.592	59.651	9033.7	7695.8
5	15.93	2.4898	3576.1	3506.4		0.33397	51.641	0.8991	57.436	56.404	58.350	8943.9	7059.0
6	15.80	2.4776	3467.6	3397.4		0.33395	49.752	0.8996	55.305	54.304	56.191	8900.3	6527.0

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.56	10.98	56	762.2	218.5	782.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.86	2.9763	4948.1	4888.8	E	0.34417	56.736	0.8945	63.428	62.000	64.692	10825.0	11439.2
2	16.28	2.9505	4421.4	4353.8		0.33867	53.023	0.8963	59.158	57.882	60.288	10508.9	9156.5
3	16.01	2.9500	4195.4	4124.9		0.33823	51.617	0.8972	57.531	56.321	58.603	10303.3	8355.6
4	15.68	2.9663	3941.9	3868.3		0.33420	48.842	0.8984	54.366	53.228	55.373	10391.2	7313.2
5	15.53	2.9809	3834.8	3760.0		0.32918	47.542	0.8990	52.883	51.777	53.863	10470.1	6894.0
6	15.25	2.9906	3610.6	3534.5		0.32943	45.909	0.9001	51.004	49.962	51.927	10305.4	6242.7

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1													
2													
3													
4													
5													
6													

熱負荷一定

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Concl量
102.98	10.10	56	765.5	226	504.3

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	19.70	1.0044	2726.4	2712.4	G	0.36532	74.891	0.9020	83.028	82.241	83.724	4260.1	12394.5
2	19.22	1.0544	2718.9	2697.4		0.36129	72.305	0.9019	80.170	79.385	80.865	4420.3	10762.7
3	18.67	1.1266	2729.8	2699.6		0.36033	71.037	0.9016	78.790	78.002	79.488	4514.6	10172.5
4	18.29	1.1744	2719.5	2683.4		0.35595	67.233	0.9015	74.579	73.794	75.274	4801.1	8593.0
5	17.79	1.2365	2688.5	2645.1		0.35071	66.245	0.9015	73.483	72.707	74.170	4813.3	8169.5
6	17.61	1.2849	2728.3	2681.5		0.35054	63.710	0.9013	70.687	69.900	71.384	5121.8	7559.4

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Concl量
103.18	9.20	56	767	223	628.6

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.74	1.3919	3360.9	3282.2	K	0.35668	68.250	0.8974	76.053	75.083	76.912	5739.7	11200.9
2	16.96	1.5239	3343.5	3250.7		0.35403	66.004	0.8972	73.567	72.602	74.421	5909.5	10177.9
3	16.41	1.6509	3365.5	3261.8		0.34953	58.994	0.8969	65.775	64.804	66.636	6810.2	8062.2
4	15.88	1.7794	3360.8	3247.4		0.34624	59.261	0.8968	66.081	65.111	66.939	6725.0	8118.5
5	15.38	1.9068	3331.8	3210.4		0.34062	57.511	0.8969	64.122	63.161	64.973	6889.0	7634.3
6	14.95	2.0712	3367.3	3236.7		0.33905	54.099	0.8968	60.324	59.353	61.185	7491.5	7019.6

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Concl量
103.04	9.31	56	767	245.5	766.7

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.66	2.0024	4161.3	4047.5	K	0.34967	62.308	0.8942	69.680	68.479	70.744	7889.0	11279.8
2	15.63	2.3571	4211.9	4072.9		0.34449	57.913	0.8939	64.787	63.572	65.863	8669.8	9918.2
3	15.00	2.5988	4180.9	4028.6		0.33986	50.885	0.8941	56.912	55.706	57.980	10099.6	8122.9
4	14.17	3.0597	4204.4	4032.4		0.33422	49.067	0.8944	54.860	53.647	55.935	10551.5	7813.8
5	13.79	3.2651	4135.8	3958.2		0.32858	47.199	0.8949	52.742	51.549	53.799	10873.7	7352.9
6	13.37	3.7168	4266.6	4073.9		0.32480	41.984	0.8950	46.909	45.678	48.000	13068.3	6786.2

表 3.2 水平管 熱負荷一定

傾斜管 出口を下位の場合

傾斜角 53'

T_g	t_1	ΔP	気圧	Vent量	Cond量
102.38	10.83	56	761.2	220	480

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_g
1	20.37	1.0002	2697.9	2724.4	F	0.36565	74.810	0.9030	82.846	82.068	83.536	4271.4	12533.4
2	20.07	1.0011	2615.4	2636.4		0.36207	72.636	0.9033	80.412	79.657	81.080	4286.6	10749.5
3	19.72	0.9984	2509.5	2524.4		0.35984	70.098	0.9038	77.559	76.835	78.201	4289.9	9085.9
4	19.55	0.9926	2447.2	2459.2		0.35964	70.336	0.9042	77.788	77.082	78.414	4160.7	8939.1
5	19.32	0.9999	2400.2	2408.7		0.35587	70.498	0.9044	77.950	77.257	78.563	4061.3	8822.6
6	19.27	0.9986	2383.0	2390.7		0.35594	68.313	0.9045	75.526	74.838	76.135	4194.1	7948.7

T_g	t_1	ΔP	気圧	Vent量	Cond量
102.88	10.28	56	764.8	219.5	673.2

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_g
1	17.44	1.9998	4048.4	3983.5	G	0.35166	63.334	0.8958	70.701	69.533	71.736	7649.8	11379.7
2	17.01	1.9819	3771.1	3701.4		0.34692	60.114	0.8968	67.032	65.943	67.995	7585.6	9463.17
3	16.76	1.9834	3633.9	3561.7		0.34771	60.347	0.8973	67.254	66.205	68.183	7255.0	9168.6
4	16.48	1.9677	3449.4	3375.3		0.34374	56.894	0.8981	63.349	62.354	64.231	7409.1	7813.2
5	16.21	1.9889	3334.7	3258.1		0.33910	56.299	0.8986	62.652	61.690	63.504	7240.4	7414.0
6	16.08	1.9970	3274.9	3197.3		0.33862	53.580	0.8989	59.606	58.661	60.443	7574.7	6755.9

T_g	t_1	ΔP	気圧	Vent量	Cond量
102.56	10.18	56	764.8	233.5	783.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_g
1	16.16	2.9881	5052.2	4949.8	G	0.34377	56.658	0.8929	63.454	61.996	64.745	10883.8	11696.2
2	15.50	2.9931	4502.2	4394.3		0.33822	52.733	0.8947	58.939	57.640	60.090	10569.8	9280.4
3	15.20	2.9948	4250.7	4141.8		0.33854	52.579	0.8957	58.702	57.475	59.787	9981.4	8700.1
4	14.95	2.9801	4019.2	3910.6		0.33423	48.840	0.8966	54.472	53.312	55.500	10373.9	7476.7
5	14.70	2.9867	3829.7	3721.1		0.32903	48.187	0.8975	53.690	52.585	54.669	10032.3	7000.6
6	14.50	2.9872	3648.7	3541.1		0.32938	45.727	0.8984	50.898	49.845	51.831	8856.4	6286.6

表 4.1 傾斜管 (出口下位)

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.48	10.83	56	761.2	222	488.5

1°53'

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	20.37	1.0222	2757.2	2781.1	F	0.36492	74.194	0.9026	82.200	81.405	82.905	4409.4	12330.8
2	20.12	1.0341	2689.9	2709.2		0.36189	72.483	0.9029	80.278	79.502	80.965	4421.4	10945.6
3	19.87	1.0240	2617.3	2632.1		0.36063	70.766	0.9032	78.350	77.595	79.019	4425.1	9766.5
4	19.70	1.0300	2583.1	2595.1		0.35962	70.319	0.9034	77.838	77.093	78.498	4396.6	9429.5
5	19.52	1.0319	2535.4	2544.4		0.35627	70.840	0.9036	78.398	77.666	79.045	4269.1	9471.5
6	19.57	1.0310	2547.8	2557.6		0.35705	69.256	"	76.644	75.909	77.296	4416.4	8856.5

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
103.20	10.30	56	764.2	230	682.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.51	1.9919	4060.6	3983.1	G	0.35154	63.232	0.8958	70.587	69.415	71.625	7695.5	11258.3
2	17.09	1.9969	3833.7	3751.5		0.34782	60.878	0.8966	67.899	66.792	68.879	7595.3	9778.6
3	16.91	1.9931	3724.9	3641.3		0.34833	60.872	0.8970	67.862	66.787	68.814	7367.5	9483.2
4	16.66	1.9745	3550.6	3465.9		0.34477	57.766	0.8977	64.349	63.324	65.256	7493.5	8192.0
5	16.38	1.9967	3432.4	3345.3		0.34066	57.636	0.8982	64.168	63.178	65.046	7244.1	7875.5
6	16.31	2.0020	3401.9	3314.2		0.34065	55.305	0.8984	61.559	60.578	62.429	7570.2	7304.6

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
103.12	10.23	56	764.2	229.5	1792.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.21	3.0123	5093.2	4961.5	G	0.34351	56.438	0.8929	63.208	61.738	64.509	11042.0	11548.0
2	15.60	2.9848	4531.9	4399.5		0.33869	53.132	0.8947	59.385	58.078	60.543	10554.1	9318.3
3	15.38	2.9964	4363.1	4230.4		0.33907	53.028	0.8954	59.223	57.964	60.338	1060.9	8928.1
4	15.08	2.9816	4088.6	3957.6		0.33582	50.187	0.8964	55.987	54.807	57.032	10200.9	7766.3
5	14.92	3.0053	3985.2	3854.0		0.33092	49.292	0.8969	54.958	53.808	55.977	10164.4	7400.4
6	14.75	3.0006	3834.7	3704.9		0.33076	46.900	0.8976	52.250	51.144	53.230	10433.8	6729.0

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
102.84	11.31	56	761.8	217.7	490.4

2°58'

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	20.76	1.0018	2676.7	2702.2	F	0.36441	73.763	0.9036	81.632	80.860	82.316	4345.5	11417.6
2	20.61	1.0011	2632.4	2655.0		0.36247	72.975	0.9038	80.742	79.983	81.415	4327.0	10756.3
3	20.49	0.9974	2588.8	2609.2		0.36191	71.849	0.9040	79.479	78.732	80.141	4336.1	9984.1
4	"	0.9972	2588.3	2608.7		0.36198	72.317	"	79.997	79.250	80.658	4299.7	10215.1
5	20.39	0.9947	2553.7	2572.3		0.35910	73.263	0.9042	81.025	80.288	81.678	4170.2	10564.2
6	20.46	0.9981	2582.2	2602.1		0.36004	71.797	0.9040	79.421	78.676	80.081	4327.8	9932.8

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
102.65	10.18	56	764	225	705

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.24	1.9867	3965.7	3905.6	G	0.35050	62.352	0.8960	69.589	68.445	70.603	7622.0	10833.2
2	17.04	1.9944	3868.3	3805.2		0.34843	61.395	0.8963	68.498	67.382	69.487	7567.7	10211.5
3	16.93	1.9834	3785.3	3721.2		0.34978	62.100	0.8966	69.262	68.169	70.229	7290.5	10221.2
4	16.81	1.9903	3730.9	3665.2		0.34703	59.680	0.8968	66.548	65.471	67.501	7551.1	9292.4
5	16.66	1.9967	3658.3	3590.7		0.34311	59.734	0.8971	66.586	65.530	67.521	7384.6	9116.6
6	16.61	1.9945	3626.0	3558.1		0.34351	57.735	0.8972	64.350	63.304	65.277	7642.9	8493.7

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.08	10.08	56	764	227	837

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.03	2.9864	5024.0	4887.4	G	0.34285	55.880	0.8929	62.583	61.133	63.867	10991.8	11216.1
2	15.58	2.9931	4634.5	4516.3		0.33993	54.184	0.8941	60.602	59.259	61.791	10542.8	9867.8
3	15.40	2.9900	4497.5	4359.6		0.34023	54.011	0.8946	60.374	59.077	61.524	10207.8	9474.6
4	15.28	2.9771	4377.1	4240.0		0.33733	51.465	0.8950	57.503	56.240	58.621	10568.8	8619.0
5	15.18	2.9882	4308.9	4171.6		0.33368	51.656	0.8953	57.697	56.453	58.798	10340.9	8518.6
6	15.05	2.9906	4202.4	4065.5		0.33486	50.384	0.8957	56.251	55.038	57.325	10406.0	8040.5

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.75	11.26	56	762	219	491.3

3°57'

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	20.71	0.9954	2659.6	2686.1	F	0.36479	74.084	0.9036	81.988	81.220	82.667	4290.5	11593.7
2	20.56	0.9960	2618.9	2646.7		0.36268	73.153	0.9038	80.939	80.184	81.609	4288.1	10844.8
3	20.44	0.9950	2582.6	2604.1		0.36219	72.086	0.9040	79.741	78.996	80.401	4304.1	10116.5
4	20.39	0.9954	2569.5	2590.2		0.36201	72.343	0.9041	80.166	79.275	80.673	4261.6	10189.2
5	20.32	0.9947	2548.0	2567.5		0.35946	73.571	0.9042	81.366	80.631	82.017	4134.9	10758.8
6	20.39	0.9986	2577.8	2598.6		0.36017	71.908	0.9040	79.544	78.800	80.203	4307.3	10008.9

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.86	10.55	56	756.8	229	742

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.69	1.9762	3989.5	3937.8	H	0.35113	62.457	0.8964	69.675	68.524	70.695	7714.7	10858.3
2	17.51	1.9768	3890.1	3835.7		0.34794	61.183	0.8968	68.223	67.101	69.218	7711.4	10122.9
3	17.46	1.9640	3837.1	3782.4		0.35055	61.981	0.8969	69.406	67.999	70.086	7475.9	10249.6
4	17.36	1.9790	3810.5	3754.0		0.34850	60.874	0.8975	67.826	66.727	68.800	7596.2	9794.1
5	17.24	1.9523	3692.8	3635.6		0.34528	61.441	"	68.458	67.392	69.402	7261.0	9662.3
6	17.31	1.9767	3778.1	3721.0		0.34733	60.913	0.8972	67.892	66.802	68.858	7517.1	9727.3

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.42	10.53	56	756.6	228	862

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.53	2.9864	5066.2	4991.4	H	0.34423	56.628	0.8934	63.385	61.923	64.680	11012.0	11751.7
2	16.11	2.9565	4664.4	4584.5		0.34041	54.791	0.8947	61.240	59.894	62.432	10533.8	10211.5
3	16.03	2.9626	4607.1	4526.0		0.34178	54.571	0.8949	60.880	59.651	62.157	10449.7	10017.3
4	15.85	2.9636	4457.8	4374.9		0.33912	52.932	0.8955	59.109	57.823	60.248	10504.9	9253.9
5	15.78	2.9571	4389.5	4306.1		0.33513	52.751	0.8957	58.894	57.627	60.015	10381.5	9062.1
6	15.83	2.9889	4478.9	4395.1		0.33783	52.841	0.8954	59.014	57.721	60.159	10576.2	9278.0

W

T_g	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.78	11.18	56	762.8		

4°57'

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	20.66	0.9975	2673.7	2697.4	F	0.36412	73.517	0.9035	81.369	80.598	82.052	4350.6	11292.5
2	20.51	0.9986	2634.3	2655.3		0.36288	73.322	0.9036	81.144	80.384	81.818	4295.4	11001.4
3	20.39	0.9984	2599.9	2618.7		0.36256	72.399	0.9038	80.105	79.355	80.770	4304.0	10340.8
4	20.32	0.9967	2575.7	2593.3		0.36202	72.351	0.9039	80.043	79.300	80.701	4265.2	10212.9
5	20.29	0.9947	2562.1	2579.2		0.35961	73.700	0.9040	81.527	80.787	82.181	4144.3	10888.9
6	20.34	0.9960	2579.5	2597.5		0.36098	72.596	0.9039	80.314	79.570	80.973	4254.1	10355.6

T_g	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.42	10.45	56	756.2	223.5	722.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.59	1.9919	4021.2	3984.4	H	0.35185	63.066	0.8962	70.370	69.210	71.398	7665.0	11347.9
2	17.39	1.9819	3888.9	3848.9		0.34869	61.820	0.8966	68.949	67.827	69.943	7589.1	10482.9
3	17.31	1.9834	3847.0	3805.6		0.35004	61.550	0.8968	68.633	67.523	69.616	7544.2	10266.5
4	17.26	1.9835	3819.1	3777.0		0.34852	60.891	0.8969	67.891	66.788	68.867	7590.0	9964.4
5	17.11	1.9837	3735.4	3691.0		0.34487	61.090	0.8972	68.090	67.012	69.044	7381.5	9797.9
6	17.19	1.9970	3805.6	3762.1		0.34650	60.208	0.8969	67.129	66.031	68.102	7667.9	9707.8

T_g	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.50	10.43	56	756.2	232.8	851.3

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.41	2.9951	5064.1	4978.6	H	0.34322	55.775	0.8933	62.437	60.976	63.731	11201.6	11435.3
2	16.06	2.9947	4767.0	4677.2		0.34028	54.681	0.8942	61.151	59.775	62.369	10775.8	10399.0
3	15.98	2.9788	4674.4	4584.2		0.34165	54.462	0.8945	60.885	59.537	62.080	10611.5	10124.1
4	15.85	2.9861	4576.1	4484.4		0.34027	53.906	0.8949	60.237	58.916	61.406	10514.1	9748.7
5	15.75	2.9744	4474.0	4382.0		0.33671	54.103	0.8952	60.437	59.146	61.580	10216.5	9571.7
6	15.80	2.9922	4543.1	4450.9		0.33832	53.258	0.8950	59.506	58.195	60.667	10599.6	9507.4

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量

6°

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1													
2													
3													
4													
5													
6													

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.20	10.45	56	756.2	216	727.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.59	1.9919	4021.2	3994.4		0.35224	63.395	0.8962	70.738	69.577	71.765	7614.2	11566.8
2	17.39	1.9968	3916.5	3885.8	H	0.34916	62.219	0.8965	69.402	68.272	70.403	7580.2	10783.0
3	17.29	1.9979	3863.8	3831.4		0.35019	61.677	0.8967	68.782	67.667	69.770	7555.3	10430.1
4	17.19	1.9992	3809.8	3775.6		0.34819	60.612	0.8969	67.579	66.480	68.553	7610.7	9912.5
5	17.09	1.9889	3733.9	3698.3		0.34540	61.544	0.8972	68.596	67.518	69.550	7307.4	10011.6
6	17.14	2.0020	3786.8	3751.8		0.34712	60.734	0.8970	67.708	66.615	68.676	7541.6	9888.7

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.54	10.40	56	756.1	221	878.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.41	2.9968	5092.4	5003.4		0.34396	56.400	0.8932	63.144	61.674	64.445	11097.4	11702.6
2	16.03	2.9815	4746.0	4653.0	H	0.34073	55.063	0.8943	61.571	60.202	62.784	10623.9	10450.8
3	15.95	2.9804	4676.9	4583.0		0.34158	54.403	0.8945	60.819	59.470	62.015	10625.6	10103.2
4	15.85	2.9801	4592.1	4497.4		0.34004	53.711	0.8948	60.026	58.701	61.199	10597.5	9724.3
5	15.80	2.9899	4565.0	4469.6		0.33685	54.223	0.8949	60.591	59.274	61.758	10397.9	9799.3
6	"	2.9822	4553.2	4458.1		0.33892	53.767	"	60.082	58.768	61.245	10486.3	9652.7

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.78	11.16	56	763	215.7	497

10°

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	20.61	0.9975	2665.2	2687.8	F	0.36760	76.458	0.9035	84.624	83.855	85.305	4125.9	13352.1
2	20.49	1.0041	2648.8	2669.3		0.36277	73.229	"	81.050	80.286	81.727	4324.3	11014.6
3	20.37	0.9979	2598.6	2616.8		0.36264	72.466	0.9038	80.179	79.429	80.843	4295.5	10370.4
4	20.37	0.9999	2603.8	2622.1		0.36249	72.749	"	80.492	79.741	81.158	4283.0	10542.3
5	20.32	0.9936	2573.3	2590.6		0.35987	73.922	0.9039	81.781	81.039	82.439	4146.8	11074.9
6	20.37	0.9991	2601.7	2620.0		0.36047	72.163	0.9038	79.844	79.093	80.509	4323.5	10226.9

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
103.16	11.03	56	762	233.5	730

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	18.12	1.9998	4008.9	3963.9	I	0.35189	63.061	0.8970	70.302	69.145	71.327	7728.4	11024.8
2	17.99	1.9944	3924.7	3877.8		0.34977	62.155	0.8973	69.269	68.136	70.272	7699.2	10447.1
3	17.96	1.9979	3914.7	3867.1		0.35183	61.013	0.8977	67.966	66.836	68.966	7868.6	10022.6
4	17.81	1.9925	3819.6	3769.9		0.34901	61.431	"	68.432	67.329	69.408	7594.3	9907.0
5	17.84	1.9967	3844.6	3795.3		0.34661	62.527	0.8976	69.660	68.551	70.643	7473.3	10350.6
6	"	1.9869	3825.7	3776.6		0.34762	61.161	0.8977	68.131	67.027	69.109	7652.6	9835.6

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
103.23	10.98	56	762	233.5	880

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.96	2.9829	5043.4	4948.3	I	0.34460	56.903	0.8942	63.626	62.180	64.925	11004.0	11526.3
2	16.66	2.9782	4782.9	4684.6		0.34213	55.682	0.8951	62.208	60.827	63.430	10701.9	10520.4
3	"	2.9788	4783.8	4685.6		0.34459	54.938	"	61.376	59.986	62.599	10897.2	10307.2
4	16.48	2.9801	4634.3	4534.4		0.34130	54.901	0.8956	61.301	59.964	62.485	10542.6	9957.2
5	16.58	2.9881	4731.2	4631.9		0.33895	55.662	0.8952	62.178	60.813	63.387	10580.1	10395.6
6	16.46	2.9906	4633.7	4533.3		0.33887	53.727	0.8956	59.990	58.653	61.174	10847.0	9645.6

T_g	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Concl量
102.90	11.21	56	763.2	216	498.8

15°18'

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	20.68	0.9964	2667.9	2688.6	F	0.36524	74.464	0.9035	82.417	81.647	83.099	4273.2	11795.4
2	20.59	0.9986	2648.4	2667.5		0.36313	73.534	0.9036	81.379	80.615	82.056	4306.8	11123.1
3	20.46	0.9969	2607.2	2624.1		0.36312	72.872	0.9038	80.628	79.876	81.295	4284.3	10564.3
4	20.44	1.0030	2617.5	2634.1		0.36265	72.885	0.9037	80.652	79.896	81.321	4299.2	10618.8
5	20.34	1.0025	2587.9	2602.7		0.359177	73.837	0.9039	81.687	80.940	82.349	4178.8	11023.8
6	20.41	1.0007	2603.0	2619.0		0.36086	72.494	0.9038	80.210	79.459	80.875	4303.8	10346.5

T_g	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Concl量
102.98	10.93	56	762	213.5	732.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.99	2.0128	4017.8	3975.7	I	0.35189	63.061	0.8968	70.318	69.158	71.345	7727.3	11118.4
2	17.91	2.0043	3955.5	3912.2		0.34993	62.290	0.8971	69.435	68.293	70.446	7724.0	10643.6
3	17.84	2.0170	3940.7	3895.9		0.35077	60.124	"	67.020	65.883	68.028	8050.9	9870.1
4	17.69	2.0081	3838.1	3791.2		0.34930	61.677	0.8975	68.721	67.613	69.702	7574.5	10096.8
5	17.71	2.0121	3857.1	3810.5		0.34628	62.245	0.8974	69.361	68.248	70.347	7523.6	10347.5
6	17.66	2.0195	3842.8	3795.2		0.34698	60.618	0.8975	67.541	66.432	68.523	7753.8	9763.3

T_g	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Concl量
103.30	10.85	56	762	225	878.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.83	2.9777	5034.7	4928.7	I	0.34440	56.734	0.8940	63.461	62.008	64.748	10994.7	11432.7
2	16.53	2.9649	4761.5	4653.3		0.34215	55.699	0.8949	62.240	60.867	63.457	10615.8	10462.2
3	"	2.9675	4765.7	4657.4		0.34316	53.738	0.8949	60.049	58.674	61.267	11144.4	9925.8
4	16.36	2.9771	4638.0	4528.2		0.34070	54.393	0.8954	60.747	59.409	61.932	10650.3	9815.2
5	16.38	2.9796	4658.8	4549.0		0.33767	54.874	0.8953	61.291	59.847	62.482	10575.9	9991.9
6	16.31	2.9755	4593.5	4483.4		0.33906	53.888	0.8955	60.176	58.851	61.350	10672.3	

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.90	11.93	56	763.8	214.5	500.6

20°

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	20.63	0.9970	2677.9	2696.8	F	0.36508	7.329	0.9034	82.277	81.504	82.961	4294.5	11758.1
2	20.51	0.9924	2631.9	2648.5		0.36317	73.568	0.9036	81.417	80.657	82.089	4271.8	11071.5
3	20.44	1.0031	2640.5	2656.0		0.36293	72.711	0.9035	80.477	79.715	81.152	4346.7	10629.0
4	20.41	0.9999	2623.6	2638.5		0.36276	72.978	0.9036	80.764	80.007	81.434	4298.1	10699.8
5	20.32	0.9968	2590.1	2603.4		0.36005	74.076	0.9038	81.961	81.213	82.623	4161.8	11182.3
6	20.37	0.9981	2607.6	2621.8		0.36031	72.027	0.9037	79.702	78.949	80.369	4342.2	10131.7

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
102.93	10.78	56	761.8	221	737.5

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.91	1.9946	4021.0	3995.9	I	0.35144	62.681	0.8966	69.910	68.749	70.937	7775.6	11003.0
2	17.76	1.9944	3936.0	3888.5		0.34980	62.180	0.8969	69.328	68.192	70.334	7679.0	10570.9
3	17.74	1.9931	3922.2	3874.4		0.35191	61.080	0.8970	68.094	66.962	69.096	7829.7	10148.5
4	17.59	1.9925	3836.5	3786.4		0.34856	61.050	0.8973	68.037	66.930	69.018	7651.8	9903.9
5	17.49	1.9915	3778.2	3726.8		0.34627	62.236	0.8975	69.344	68.254	70.309	7343.5	10139.5
6	"	1.9995	3793.4	3741.8		0.34614	59.904	0.8974	66.753	65.658	67.722	7745.5	9432.3

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Cond量
103.04	10.85	56	761.8	222	882.5

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{mo}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.83	2.9812	5040.6	4948.9	I	0.34423	56.590	0.8940	63.300	61.845	64.588	11045.0	11476.0
2	16.56	2.9649	4786.7	4692.3		0.34210	55.656	0.8948	62.199	60.818	63.423	10686.5	10577.4
3	16.53	2.9788	4783.8	4688.7		0.34497	55.257	"	61.753	60.373	62.976	10778.5	10453.1
4	16.33	2.9861	4626.7	4529.5		0.34066	54.308	0.8954	60.652	59.317	61.835	10642.1	9829.8
5	16.36	2.9692	4625.7	4529.3		0.33805	55.200	"	61.648	60.314	62.831	10415.8	10071.1
6	16.33	2.9654	4594.6	4498.2		0.33847	53.387	"	59.617	58.291	60.791	10811.4	9520.5

98

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.26	10.00	56	767.8	231	487

傾斜角 53'

傾斜管, 出口を上位の場合

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	19.77	0.9938	2745.2	2753.4	J	0.36488	75.692	0.9019	83.925	83.133	84.627	4232.9	13629.0
2	19.37	0.9883	2618.3	2619.9		0.36241	73.021	0.9024	80.919	80.163	81.589	4208.0	11088.2
3	19.07	0.9897	2538.0	2535.1		0.36097	71.322	0.9028	79.001	78.269	79.650	4190.5	9826.7
4	18.82	1.0079	2513.5	2506.8		0.35873	69.370	0.9028	76.839	76.113	77.481	4286.7	8880.2
5	18.72	0.9920	2445.8	2437.9		0.35594	70.535	0.9032	78.093	77.388	78.719	4083.1	9095.2
6	18.64	0.9960	2433.1	2424.1		0.35669	68.799	0.9033	76.164	75.462	76.786	4187.5	8361.6

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
103.10	9.82	56	767.8	252	683.5

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.96	1.9998	4037.1	3941.7	J	0.35064	63.600	0.8952	71.046	69.881	72.077	7517.6	11392.4
2	16.51	2.0018	3786.5	3687.5		0.34673	59.734	0.8961	66.660	65.567	67.628	7601.3	9344.9
3	16.26	1.9979	3637.9	3537.8		0.34525	58.025	0.8966	64.717	63.667	65.646	7559.0	8503.2
4	16.03	2.0015	3514.3	3413.1		0.34358	56.546	0.8971	63.032	62.018	63.930	7530.2	7854.4
5	15.88	2.0018	3429.9	3328.3		0.33946	56.425	0.8975	62.869	61.879	63.746	7338.5	7629.8
6	15.65	1.9970	3291.8	3190.2		0.33952	54.215	0.8981	60.366	59.416	61.208	7417.6	6879.0

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
103.12	9.69	56	768	226	795

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	15.68	2.9899	5063.7	4903.7	J	0.34291	57.040	0.8922	63.932	62.471	65.226	10697.8	11698.3
2	15.10	2.9798	4558.0	4399.5		0.33802	52.350	0.8937	58.577	57.261	59.742	10685.3	9198.7
3	14.82	2.9900	4336.9	4179.5		0.33660	50.698	0.8945	56.677	55.426	57.786	10565.9	8374.9
4	14.52	2.9920	4086.0	3931.1		0.33428	48.680	0.8955	54.361	53.182	55.405	10461.9	7496.7
5	14.37	2.9744	3935.8	3783.4		0.32989	48.231	0.8961	53.823	52.688	54.829	10180.8	7135.0
6	14.12	2.9839	3727.4	3587.7		0.32946	45.668	0.8970	50.912	49.833	51.867	10363.5	6383.8

表 4.2 傾斜管 (出口上位)

T_g	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Concl量
103.04	10.20	56	768	228.5	492.5

傾斜角 $1^\circ 53'$

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	19.80	1.0044	2726.2	2713.6	J	0.36422	75.130	0.9021	83.283	82.497	83.980	4250.3	12521.8
2	19.55	0.9970	2635.7	2619.6		0.36223	72.871	0.9026	80.735	79.974	81.408	4260.7	10666.7
3	19.42	1.0041	2617.6	2599.6		0.36240	72.537	0.9026	80.365	79.609	81.033	4250.9	10413.1
4	19.32	1.0035	2587.6	2568.3		0.36208	72.198	0.9027	79.980	79.233	80.641	4223.3	10113.5
5	19.25	0.9947	2545.2	2525.2		0.35913	73.259	0.9030	81.128	80.394	81.779	4078.1	10480.1
6	19.22	0.9981	2545.5	2525.0		0.36007	71.677	0.9030	79.377	78.642	80.027	4189.7	9683.4

T_g	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Concl量
103.08	9.97	56	768	222	687

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	17.16	1.9946	4054.8	3967.7	J	0.35055	63.521	0.8954	70.941	69.771	71.978	7589.0	11413.1
2	16.76	1.9993	3838.3	3747.2		0.34774	60.582	0.8961	67.606	66.499	68.587	7599.2	9741.8
3	16.53	1.9955	3701.2	3608.2		0.34649	59.069	0.8966	65.881	64.813	66.827	7550.9	8937.7
4	16.38	1.9903	3607.1	3513.9		0.34500	57.748	0.8970	64.379	63.338	65.301	7564.4	8358.6
5	16.23	1.9967	3534.1	3439.8		0.34096	57.703	0.8973	64.307	63.288	65.211	7407.2	8169.9
6	16.01	1.9843	3388.7	3294.2		0.34027	54.852	0.8979	61.089	60.111	61.955	7565.2	7213.7

T_g	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Concl量
103.16	9.72	56	768	231	807

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	15.65	3.0037	5236.1	4874.8	J	0.34282	56.963	0.8923	63.838	62.385	65.125	10657.6	11591.6
2	15.15	2.9947	4597.7	4437.8		0.33863	52.867	0.8936	59.162	57.835	60.337	10651.5	9399.1
3	14.87	2.9996	4367.8	4209.3		0.33766	51.596	0.8945	57.681	56.421	58.798	10410.7	8619.6
4	14.60	3.0039	4144.7	3988.3		0.33537	49.603	0.8953	55.404	54.208	56.463	10366.8	7770.2
5	14.50	3.0070	4064.0	3908.4		0.33062	48.852	0.8956	54.547	53.374	55.585	10357.9	7478.2
6	14.22	2.9956	3811.4	3659.8		0.33063	46.662	0.8967	52.037	50.938	53.012	10286.6	6653.6

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
102.86	10.20	56	768.5	226	492

傾斜角 $2^{\circ}58'$

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	19.85	0.9991	2726.0	2719.7	J	0.36422	75.136	0.9022	83.281	82.494	83.978	4251.7	12638.4
2	19.60	0.9970	2649.8	2639.8		0.36230	72.925	0.9025	80.803	80.039	81.481	4280.9	10850.3
3	19.44	0.9993	2610.7	2598.4		0.36284	72.911	0.9027	80.770	80.017	81.437	4213.8	10668.6
4	19.37	0.9990	2590.1	2576.9		0.36208	72.205	0.9027	79.988	79.240	80.650	4228.6	10209.2
5	19.37	0.9947	2579.0	2565.8		0.35975	73.790	0.9028	81.735	80.990	82.394	4098.8	11031.5
6	19.35	0.9981	2582.2	2568.6		0.36208	71.853	0.9028	79.589	78.844	80.249	4241.2	9997.6

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
703.23	9.92	56	768.5	237.5	713.5

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	17.09	1.9998	4054.1	3957.7	J	0.35041	63.401	0.8953	70.815	69.646	71.851	7596.6	11310.7
2	16.88	1.9993	3934.4	3836.2		0.34876	61.451	0.8957	68.607	67.471	69.612	7654.6	10245.6
3	16.73	2.0003	3851.5	3752.2		0.34881	61.036	0.8960	68.121	67.009	69.105	7547.0	9880.6
4	16.93	1.9992	3849.4	3750.1		0.34835	60.587	0.8960	67.619	66.509	68.603	7614.1	9732.1
5	16.63	1.9993	3793.0	3693.1		0.34473	60.935	0.8962	67.993	66.898	68.962	7440.6	9689.9
6	16.43	1.9995	3680.4	3579.3		0.34471	58.629	0.8966	65.390	64.328	66.331	7568.6	8731.9

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
103.28	9.79	56	768.5	222.5	841

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	15.60	3.0003	4928.7	4764.8	J	0.34259	56.764	0.8927	63.587	62.165	64.847	10478.6	11226.6
2	15.30	2.9997	4673.2	4510.3		0.33959	53.677	0.8935	60.075	58.727	61.269	10643.2	9738.3
3	15.18	2.9996	4571.3	4408.9		0.33970	53.322	0.8939	59.651	58.332	60.819	10486.7	9424.9
4	15.03	2.9995	4443.9	4282.5		0.33847	52.225	0.8943	58.398	57.115	59.533	10454.7	8893.0
5	"	3.0001	4444.8	4283.3		0.33436	52.056	"	58.209	56.926	59.345	10501.4	8856.5
6	14.80	3.0006	4250.4	4090.7		0.33400	49.527	0.8950	55.337	54.111	56.424	10691.0	7941.2

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.18	10.05	56	768.8	236.0	492.0

15度斜向 3°57'

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	19.55	0.9938	2669.4	2646.7	J	0.36424	75.149	0.9023	83.286	82.516	83.968	4148.1	12163.9
2	19.32	1.0021	2626.5	2600.7		0.36238	72.998	0.9024	80.893	80.125	81.564	4222.8	10637.4
3	19.22	1.0041	2603.4	2576.2		0.36263	72.735	0.9025	80.593	79.842	81.258	4201.2	10396.6
4	19.22	1.0035	2601.8	2574.7		0.36211	72.230	0.9025	80.033	79.282	80.698	4235.1	10131.4
5	19.27	0.9999	2606.6	2580.2		0.36013	74.116	0.9025	82.123	81.371	82.789	4111.3	11190.9
6	19.25	1.0032	2609.5	2582.8		0.36047	72.010	0.9025	79.789	79.036	80.456	4264.9	10053.2

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.25	9.87	56	768.8	232.5	713.5

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	17.01	1.9919	4021.2	3921.8	J	0.35039	63.388	0.8954	70.793	69.633	71.821	7527.8	11200.7
2	16.73	1.9894	3858.6	3757.3		0.34808	60.876	0.8959	67.950	66.836	68.936	7582.0	9844.2
3	16.66	1.9955	3831.0	3728.8		0.34897	60.997	0.8960	68.077	66.972	69.056	7503.6	9808.1
4	16.66	2.0015	3842.5	3740.0		0.34810	60.375	0.8960	67.383	66.274	68.365	7625.5	9642.7
5	16.56	1.9967	3776.8	3674.0		0.34964	60.855	0.8962	67.903	66.814	68.869	7412.1	9616.7
6	16.36	2.0020	3673.6	3569.6		0.34435	58.318	0.8966	65.043	63.983	65.982	7597.0	8629.5

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.14	9.79	56	768.5	218.5	849.5

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	15.63	3.0106	4971.1	4814.1	J	0.34228	56.503	0.8926	63.302	61.867	64.572	10636.2	11283.7
2	15.33	2.9848	4675.3	4520.0		0.33972	53.783	0.8935	60.194	58.845	61.388	10624.3	9803.1
3	15.25	2.9996	4630.7	4474.8		0.34030	53.829	0.8937	60.232	58.895	61.415	10501.9	9715.8
4	15.15	3.0069	4556.9	4401.1		0.33909	52.747	0.8939	59.008	57.693	60.172	10598.1	9284.4
5	15.18	2.9933	4561.7	4406.5		0.33582	53.309	"	59.636	58.320	60.802	10467.4	9432.5
6	14.95	2.9365	4284.2	4133.0		0.33628	51.467	0.8948	57.518	56.282	58.613	10261.2	8423.1

11度斜角 4°57'

T_g	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.25	10.03	56	768.8	236.	496

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	19.62	0.9938	2694.7	2670.4	J	0.36461	75.462	0.9021	83.651	82.874	84.340	4174.9	12475.2
2	19.40	0.9970	2641.3	2614.2		0.36303	73.551	0.9023	81.515	80.753	82.190	4217.1	10979.6
3	19.25	1.0041	2617.6	2588.4		0.36278	72.861	0.9024	80.741	79.986	81.410	4223.5	10492.6
4	19.25	1.0035	2616.0	2586.9		0.36241	72.479	0.9024	80.318	79.563	80.987	4248.5	10286.6
5	19.32	0.9999	2626.4	2598.2		0.35973	73.773	0.9024	81.752	80.994	82.423	4175.3	11039.9
6	19.27	1.0032	2620.9	2592.0		0.36121	72.639	0.9024	80.495	79.739	81.165	4245.7	10389.2

T_g	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.08	9.77	56	768.8	233.5	1721

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	16.93	1.9998	4048.4	3951.9	J	0.35038	63.380	0.8951	70.808	69.640	71.842	7565.7	11345.7
2	16.71	1.9894	3903.6	3805.8		0.34843	61.170	0.8956	68.301	67.174	69.298	7613.9	10116.0
3	16.61	2.0003	3868.5	3769.3		0.34858	60.838	0.8957	67.922	66.806	68.911	7590.1	9911.4
4	"	2.0015	3870.8	3771.6		0.34875	60.925	"	68.019	66.902	69.009	7580.9	9945.8
5	16.56	1.9915	3823.3	3724.3		0.34540	61.507	0.8959	68.654	67.551	69.631	7394.8	10006.5
6	16.41	2.0020	3758.5	3658.1		0.34578	59.536	0.8961	66.439	65.354	67.400	7564.9	9221.7

T_g	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.48	9.64	56	768.8	233.5	852

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_{w1}	R_s
1	15.55	2.9916	4998.9	4816.9	J	0.34311	57.204	0.8923	64.108	62.666	65.386	10500.3	11488.0
2	15.25	2.9699	4710.8	4531.6		0.34047	54.427	0.8931	60.942	59.582	62.146	10511.2	9977.2
3	15.15	2.9900	4658.1	4478.4		0.34029	53.826	0.8933	60.255	58.911	61.446	10532.3	9701.3
4	15.08	3.0024	4618.0	4438.1		0.33946	53.060	0.8935	59.384	58.052	60.565	10630.1	9420.4
5	"	2.9950	4606.6	4427.2		0.33591	53.382	"	59.745	58.416	60.922	10519.9	9476.0
6	14.85	2.9788	4388.0	4211.6		0.33563	50.914	0.8942	56.938	55.672	58.059	10627.7	8457.5

103

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.16	9.90	56	769		

傾斜角 10°

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	19.47	0.9991	2703.4	2677.6	J	0.36427	75.174	0.9019	83.351	82.571	84.042	4190.5	12379.0
2	19.32	0.9990	2655.4	2627.7		0.36289	73.425	0.9021	81.393	80.627	82.072	4232.7	11023.6
3	19.12	1.0089	2630.1	2599.6		0.36281	72.883	0.9022	80.784	80.025	81.456	4224.2	10608.1
4	19.15	1.0035	2624.5	2594.6		0.36226	72.355	"	80.198	79.441	80.869	4254.4	10307.3
5	19.17	0.9947	2607.1	2577.7		0.36002	74.027	0.9024	82.033	81.281	82.700	4109.9	11155.1
6	19.10	1.0083	2622.8	2592.1		0.36059	72.113	0.9022	79.930	79.173	80.600	4267.6	10178.0

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.14	9.69	56	769		

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.73	1.9998	3980.6	3877.0	J	0.34979	62.877	0.8952	70.238	69.089	71.255	7493.4	10929.3
2	16.51	1.9993	3855.2	3750.2		0.34843	61.170	0.8957	68.293	67.181	69.278	7498.8	9967.0
3	16.43	1.9955	3802.8	3697.4		0.34873	60.965	0.8959	68.049	66.952	69.021	7422.6	9757.3
4	16.38	1.9813	3747.7	3642.9		0.34799	60.276	0.8960	67.273	66.191	68.230	7416.4	9398.2
5	16.33	1.9837	3724.2	3619.0		0.34509	61.238	0.8961	68.338	67.264	69.290	7220.3	9631.7
6	16.16	2.0020	3662.3	3555.4		0.34474	58.651	0.8964	65.429	64.373	66.365	7488.1	8718.3

T_s	t_1	ΔP	大氣压	Vent量	Cond量
103.08	9.64	56	768.8		

n	t_2	U	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	15.48	3.0175	4982.5	4820.4	J	0.34216	56.396	0.8923	63.203	61.765	64.476	10650.1	11299.1
2	15.18	3.0079	4711.5	4550.5		0.34004	54.059	0.8932	60.523	59.163	61.767	10599.0	9974.2
3	15.00	3.0314	4594.0	4432.6		0.33983	53.437	0.8936	59.800	58.474	60.974	10468.4	9551.5
4	14.97	2.9920	4509.0	4349.7		0.33886	52.553	0.8938	58.797	57.496	59.950	10494.0	9152.2
5	14.95	3.0001	4504.2	4344.6		0.33440	52.091	"	58.280	56.981	59.432	10601.6	9033.9
6	14.70	2.9956	4285.7	4128.1		0.33511	50.469	0.8946	56.415	55.178	57.510	10480.4	8233.3

104

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Concl量
103.04	9.87	56	769		

化页斜角 $15^\circ 18'$

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	19.52	0.9991	2725.9	2704.0	J	0.36462	75.470	0.9018	83.688	82.902	84.385	4205.6	12792.4
2	19.32	0.9919	2650.3	2625.8		0.36317	73.664	0.9022	81.649	80.885	82.327	4207.2	11201.4
3	19.17	1.0041	2640.3	2613.6		0.36317	73.188	0.9021	81.131	80.369	81.805	4219.3	10885.2
4	19.17	0.9990	2626.9	2600.3		0.36274	72.761	0.9022	80.648	79.890	81.320	4228.7	10587.8
5	19.20	0.9894	2610.0	2584.1		0.36053	74.462	0.9023	82.524	81.772	83.192	4084.5	11511.8
6	19.15	1.0032	2632.2	2605.3		0.36101	72.469	0.9022	80.325	79.565	80.997	4257.8	10454.0

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Concl量
103.30	9.61	56	769		

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.81	1.9919	4054.9	3942.5	J	0.35043	63.424	0.8949	70.873	69.703	71.909	7550.8	11308.6
2	16.61	1.9993	3957.0	3842.8		0.34913	61.765	0.8952	68.996	67.854	70.007	7603.8	10405.0
3	16.43	2.0051	3866.4	3751.0		0.34888	61.090	0.8955	68.219	67.103	69.207	7520.2	9928.1
4	16.41	2.0015	3848.1	3732.9		0.34770	60.029	0.8956	67.027	65.916	68.010	7651.5	9546.0
5	16.31	2.0018	3792.1	3676.5		0.34453	60.758	0.8958	67.825	66.731	68.795	7418.3	9621.0
6	16.23	1.9919	3728.3	3613.0		0.34484	58.735	0.8960	65.552	64.477	66.505	7607.3	8870.6

T_s	t_1	ΔP	大气压	Vent量	Concl量
103.14	9.49	56	769		

n	t_2	u	Q	K	R_0	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	15.38	3.0003	4996.5	4824.1	J	0.34256	56.738	0.8920	63.608	62.166	64.885	10567.1	11434.0
2	15.08	2.9881	4722.7	4552.1		0.34066	54.582	0.8929	61.129	59.766	62.336	10461.2	10132.4
3	14.92	2.9964	4600.3	4430.1		0.34059	54.079	0.8933	60.538	59.211	61.714	10292.6	9721.7
4	14.87	2.9950	4555.8	4386.0		0.33902	52.685	0.8934	58.971	57.657	60.136	10536.4	9274.3
5	14.82	3.0001	4521.2	4351.4		0.33542	52.967	0.8935	59.280	57.976	60.436	10377.4	9268.5
6	14.62	3.0006	4352.2	4184.2		0.33552	50.815	0.8941	56.834	55.578	57.946	10517.3	8430.5

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
103.04	9.79	56	769		

傾斜角 20°

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	19.42	1.0044	2734.8	2709.9	J	0.36433	75.225	0.9017	83.426	82.637	84.125	4230.1	12657.2
2	19.22	0.9970	2658.2	2631.0		0.36292	73.451	0.9020	81.431	80.664	82.111	4228.1	11118.8
3	19.10	0.9993	2630.5	2601.7		0.36266	72.752	0.9021	80.647	79.888	81.320	4229.8	10602.3
4	19.12	0.9990	2635.3	2606.8		0.36293	72.920	"	80.884	80.073	81.507	4226.2	10714.1
5	19.10	0.9947	2618.4	2589.7		0.36015	74.131	0.9022	82.167	81.411	82.836	4114.2	11345.6
6	19.05	0.9981	2613.2	2583.8		0.36097	72.434	"	80.286	79.532	80.954	4223.2	10358.1

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
103.08	9.54	56	769		

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	16.63	1.9998	4008.9	3901.7	J	0.35035	63.354	0.8949	70.795	69.638	71.819	7456.8	11226.6
2	16.41	2.0018	3888.3	3779.7		0.34876	61.454	0.8953	68.641	67.519	69.634	7498.9	10177.6
3	16.31	2.0003	3828.9	3719.7		0.34916	61.327	0.8955	68.484	67.379	69.462	7396.3	9970.8
4	16.18	2.0170	3786.7	3676.1		0.34806	60.340	0.8957	67.366	66.274	68.334	7457.2	9540.8
5	16.16	1.9967	3737.3	3627.7		0.34491	61.091	0.8959	68.190	67.111	69.145	7244.7	9641.2
6	16.11	1.9945	3705.0	3595.3		0.34535	59.168	0.8960	66.036	64.967	66.983	7474.6	8985.4

T_s	t_1	ΔP	大気圧	Vent量	Cond量
103.18	9.46	56	769		

n	t_2	U	Q	K	R_o	R	T_{m0}	ϕ	T_m	T_{w1}	T_{w2}	R_w	R_s
1	15.35	2.9899	4979.2	4803.7	J	0.34283	56.964	0.8920	63.861	62.424	65.133	10469.7	11457.0
2	15.08	2.9798	4734.9	4561.0		0.34104	54.909	0.8928	61.502	60.136	62.712	10403.9	10243.0
3	14.92	2.9772	4586.1	4423.4		0.34077	54.226	0.8932	60.710	59.384	61.884	10242.4	9743.4
4	14.85	2.9861	4550.7	4378.0		0.33935	52.968	0.8934	59.288	57.975	60.451	10445.6	9323.6
5	14.77	2.9899	4488.9	4316.6		0.33497	52.575	0.8936	58.835	57.540	59.982	10393.2	9097.2
6	14.60	2.9856	4353.5	4182.3		0.33087	46.866	0.8941	52.417	51.161	53.530	11704.6	7676.1